

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Anàlisi de l'acció del vent sobre un edifici aïllat.

MEMÒRIA

Autor: Joel Guardiet Vega

Director: Enric Trillas Gay

Convocatòria: Setembre 2018

Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

Resum

Aquest Treball de Fi de Grau consisteix en fer un estudi de l'impacte del vent en un edifici aïllat, l'edifici escollit ha estat l'Hotel W.

Per tal de realitzar aquest estudi, s'ha utilitzat un programari que permet dur a terme simulacions mitjançant el càlcul computacional dels fluids, en aquest cas el programa utilitzat ha estat el ANSYS Workbench CFX.

Mitjançant l'estudi de les condicions d'aquest cas, s'ha creat una simulació que emula la realitat i permet treure conclusions sense la necessitat de fer un experiment amb un túnel de vent.

La metodologia seguida ha estat la següent:

En primer lloc s'ha creat un model per a representar l'estructura mitjançant els diferents plànols que s'han trobat.

A continuació s'ha realitzat un repàs a la teoria de mecànica dels fluids, juntament amb un estudi de quines condicions es troba l'estructura, és a dir els diferents aspectes a tenir presents del vent.

Seguidament s'ha realitzat una recerca d'informació del programari per a entendre com funcionaven les diferents parts d'aquest. Aquest tipus de programa es divideix principalment en un preprocessador, un solucionador i el postprocessador.

En el primer s'ha introduït tota la informació necessària per a definir el problema, el segon és el que ha permès arribar a una solució, la qual s'ha comprovat que hagi convergit i l'últim que és l'apartat mitjançant el qual s'ha pogut visualitzar els diferents resultats.

Les simulacions realitzades han estat triades segons la situació real de l'edifici i tres de situacions diferents entre si, d'aquesta manera s'ha simulat la realitat i altres hipotètiques orientacions que podria tenir l'edifici.

Tot seguit s'ha comparat els resultats de les diferents simulacions dutes a terme i s'ha fet un petit estudi de les possibles millores que es podrien fer.

Per culminar el treball, s'exposen les conclusions assolides després de haver realitzat aquest treball.

Sumari

RESUM	3
SUMARI	5
1. GLOSSARI	8
2. PREFACI	9
2.1 Origen del projecte	9
2.2 Motivació	9
3. INTRODUCCIÓ	10
3.1 Objectius del projecte	10
3.2 Abast del projecte	10
4. DESCRIPCIÓ DE L'HOTEL W.	11
5. DISSENY DEL MODEL AMB EL PROGRAMARI SOLIDWORKS.	13
6. INTRODUCCIÓ A L'ANÀLISI AERODINÀMIC	15
6.1 Conceptes bàsics de la mecànica de fluids.....	15
6.2 Estudi del vent en els edificis.....	18
6.3 Estudi del vent en la zona d'estudi.....	20
7. INTRODUCCIÓ AL PROGRAMARI ANSYS WORKBENCH	23
7.1 Preprocessor:.....	23
7.1.1 Geometry:	23
7.1.2 Mesh.....	24
7.1.3 Setup.....	24
7.2 Solver	25
7.3 Postprocessor	25
8. SIMULACIÓ DEL CAS D'ESTUDI AMB PROGRAMARI CFD	26
8.1 Simulació orientat a 0º:	27
8.1.1 Geommetry:	27
8.1.2 Mesh:.....	30
8.1.2.1 Importància del mallat i factors a tenir presents	30
8.1.2.2 Mallat del cas d'estudi	32
8.1.3 Setup	36
8.1.3.1 Analysis Type	36

8.1.3.2 Default Domain	36
8.1.3.3 Condicions de contorn	38
8.1.3.4 Solution units.	39
8.1.3.5 Solver control	39
8.1.3.6 Output Control, Monitor Points:	40
8.1.4 Solver	40
8.1.5 Results	41
8.1.5.1 Velocitats:	42
8.1.5.2 Pressions:	44
8.2 Simulació orientat a 45º:	47
8.2.1 Geommetry:	47
8.2.2 Mesh	47
8.2.3 Setup	48
8.2.3.1 Output Control, Monitor Points:	48
8.2.4 Solver	48
8.2.5 Results	49
8.2.5.1 Velocitats:	49
8.2.5.2 Pressions:	51
8.3 Simulació orientat a 90º:	53
8.3.1 Geommetry:	53
8.3.2 Mesh	54
8.3.3 Setup	55
8.3.3.1 Output Control, Monitor Points:	55
8.3.4 Solver	55
8.3.5 Results	56
8.3.5.1 Velocitats:	56
8.3.5.2 Pressions:	57
8.4 Simulació orientat a oestº:	59
8.4.1 Geommetry:	59
8.4.2 Mesh	60
8.4.3 Setup	60
8.4.3.1 Output Control, Monitor Points:	60
8.4.4 Solver	61
8.4.5 Results	62
8.4.5.1 Velocitats:	62
8.4.5.2 Pressions:	64

8.5 Simulació orientat a sudº:	66
8.5.1 Geommetry:	66
8.5.2 Mesh	66
8.5.3 Setup	67
8.5.3.1 Output Control, Monitor Points:	67
8.5.4 Solver	67
8.5.5 Results	69
8.5.5.1 Velocitats:	69
8.5.5.2 Pressions:	70
8.6 Comparació i anàlisi dels resultats de les diferents simulacions	72
9. IMPACTE MEDIAMBIENTAL	74
10. PRESSUPOST	75
11. CONCLUSIONS	76
BIBLIOGRAFIA	78

1. Glossari

CFD: Dinàmica computacional de fluids.

CFX: mòdul de CFD de la companyia ANSYS Inc.

C_D : Coeficient d'arrossegament.

RMS: Root Mean Square, Mitjana quadràtica.

CTE: Código Técnico de la Edificación

2. Prefaci

2.1 Origen del projecte

L'origen d'aquest projecte ha estat l'interès per les diferents assignatures de Mecànica de Fluids i les de Resistència de Materials que s'han cursat durant el grau, incloent quatre optatives. Per aquest motiu es va trobar realment interessant fer un estudi sobre l'impacte del vent en una estructura. Tot i que no s'entri en cap moment amb detall sobre l'estructura, aquest treball està relacionat amb les dues branques.

Així doncs, aquest treball sorgeix de comentar aquest interès amb el tutor. En conseqüent es va buscar un edifici en el que es poguessin treure conclusions més fàcilment, en altres paraules es va buscar un edifici de grans dimensions i que estigués aïllat.

2.2 Motivació

El motiu principal ve degut a l'experiència laboral que vaig tenir un estiu en que vaig poder treballar en una empresa amb arquitectes i enginyers i vaig poder observar la metodologia que tenien. Així doncs, aquesta consistia en que l'arquitecte creés un disseny i l'enginyer hagués de realitzar els càlculs corresponents i fer una proposta de la estructura, detallant la ubicació de les bigues i la seva mida entre d'altres especificacions. Si aquesta proposta no convenia a l'arquitecte, es tornava a dissenyar l'estructura.

Per aquest motiu he trobat interessant realitzar un estudi que permet entrar en aspectes del disseny, raonant com aquest pot influir i en conseqüent per a tenir una manera d'interactuar amb l'arquitecte, per a què si l'estructura no funciona es tinguin alternatives.

3. introducció

3.1 Objectius del projecte

Aquest treball compren diferents objectius que s'explicaran en aquest apartat.

En primer lloc es vol crear una bona aproximació de l'estructura d'estudi mitjançant el programari Solidworks, per tant serà important definir correctament la geometria.

En segon lloc, es busca realitzar un estudi de les condicions en les que es troba l'edifici, concretament les característiques del flux del vent.

A continuació es vol aprendre a utilitzar el programari Ansys Workbench CFX, per tal d'establir la relació entre la teoria i les eines de les que disposa aquest programa, d'aquesta manera es podrà crear una simulació més fidel a la realitat.

Seguidament s'intentarà trobar els diferents valors que puguin permetre treure conclusions en quant a l'aerodinàmica de l'edifici. I en conseqüència, buscar una possible millora del cas real.

També es busca observar la rellevància que pot tenir el vent, estudiant fins a quin punt es pot millorar el cas d'estudi.

Per últim es vol veure la importància que pot tenir un enginyer en un disseny d'un arquitecte, i com el primer pot influir en un projecte.

3.2 Abast del projecte

L'abast del projecte ve determinat per el coneixement d'aquesta branca i de la branca de resistència dels materials.

Per tant com que no es disposa d'un coneixement mínim en quant a estructures de formigó armat, que són la base de les estructures dels edificis, només s'ha entrat en l'anàlisi de l'impacte del vent.

Pel que respecta a la branca de mecànica de fluids, tampoc es disposa de un coneixement molt avançat i en conseqüent no s'ha realitzat altres estudis com el transitori que podrien aportar alguna dada més al problema.

En conseqüent en aquest treball s'ha realitzat un estudi estacionari de l'impacte del vent segons diferents orientacions, i amb els coneixements adquirits durant el grau s'ha realitzat una comparativa entre els casos per a poder trobar una solució que millori l'actual.

4. Descripció de l'hotel W.

L'edifici del qual es farà l'estudi és un hotel situat a la costa de de Barcelona, a primera línia del mar. L'edifici té una forma similar a una vela, que justament és la part del vaixell que té com a objectiu ajudar-se de la força que li proporciona el vent per a desplaçar-se. Per contra, en edificis de tanta altura, convé tot el contrari, en altres paraules, intentar minimitzar els efectes de l'impacte del vent.

L'hotel en qüestió es divideix en tres zones (veure figura 4.1):

- La primera és la ja mencionada vela, que és la zona més alta.
- La segona és l'atri, que té forma d'hexaedre i es troba al costat de la vela.
- La tercera és el pòdium, en el qual s'hi troben al damunt les dos primeres zones.

Per a l'estudi de l'impacte del vent s'ha trobat oportú negligir la influència que hi té sobre el pòdium, al ser una regió que creix principalment en horitzontal. Per tant la simulació que s'ha realitzat ha estat a partir d'un model simplificat de la vela i l'atri.



Figura 4.1: Fotografia de l'Hotel W

En les figures 4.2 i 4.3, es poden observar els plànols que s'han utilitat per a realitzar el model de l'edifici. La 4.2 és la planta de la vela i l'atri.

La planta de la vela està formada per dos arcs que estan units mitjançant per dos línies que es tallen al pla de simetria de la vela.

Cal mencionar que pot ser possible que a l'hora de dissenyar l'edifici, l'arquitecte en qüestió hagués considerat una el·lipse en canvi de dos arcs. No obstant després d'observar amb profunditat els plànols i la comparativa amb els croquis creats amb el programari solidworks (que s'explicarà amb més detall més endavant), s'ha considerat que la planta va ser dissenyada a partir de dos arcs.



Figura 4.2: Planta de la vela i l'atri [1]

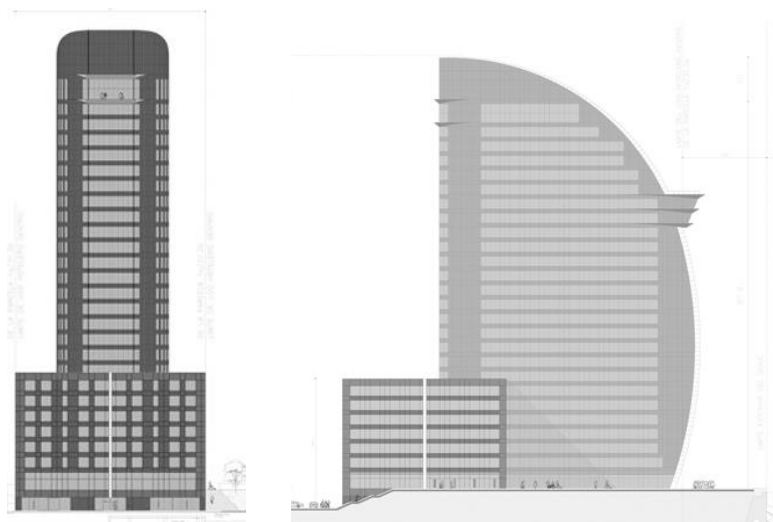


Figura 4.3: Perfil i alçat de la vela i l'atri [1]

5. Disseny del model amb el programari solidworks.

Per a dissenyar el model que s'utilitzarà per a realitzar la simulació, s'ha fet ús del programari solidworks, ja que serveix per a crear els tipus d'arxiu que es necessita pel simulador, i a més, s'ensenya durant el grau, facilitant així la creació de l'objecte en qüestió.

Per a la creació del model s'ha utilitzat les eines corresponents a sòlids i no a les relacionades amb superfícies, ja que en un primer moment es va crear a partir de superfícies, i aquest donava certs errors en el programa de simulació. A més a més, l'opció del sòlid ha resultat més fàcil tant en la seva creació com en els passos que s'havien de seguir en el programari CFD.

Per a la seva realització s'ha començat per el disseny de la base de la vela (figura 5.1). A continuació s'ha procedit a fer una extrusió d'aquesta base però amb excés de material (figura 5.1). Ja que la creació directa de la vela a partir d'eines d'extrusió resultava molt més complicada.

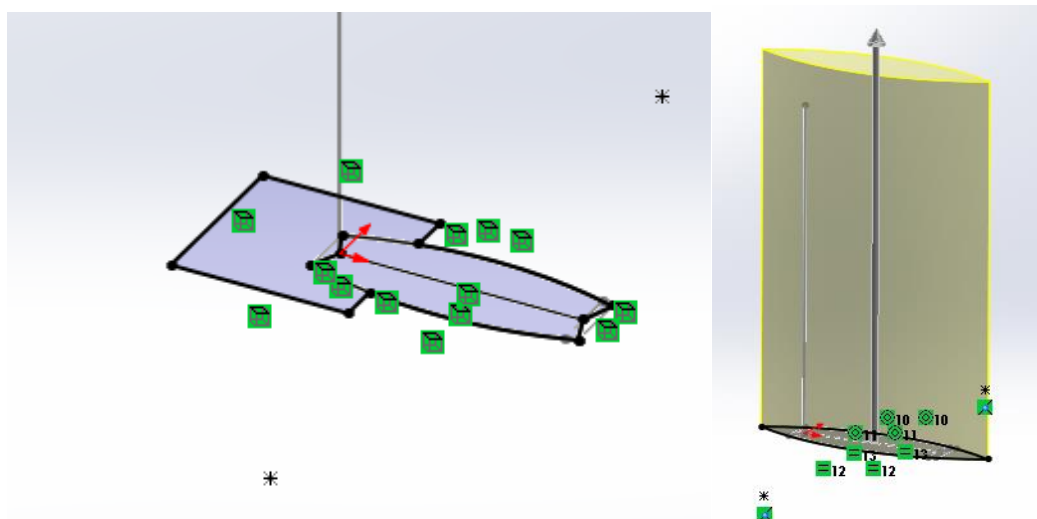


Figura 5.1: Croquis de la base a l'esquerra i extrusió de la vela a la dreta

Aquest excés de material s'ha retirat amb una operació de retallat. Així doncs agafant el croquis de la base com a referència s'ha creat un altre croquis que serà el que retalli el cos, en concret s'ha creat un arc amb l'angle corresponent al que tenien les dos rectes de la base i amb un radi suficientment gran per a que retalli tot el material que no es necessita.

A continuació s'ha hagut de traçar una trajectòria no lineal per aquesta operació com es pot veure a la figura 5.2 que és el que li dóna aquesta forma tan característica semblant a una vela.

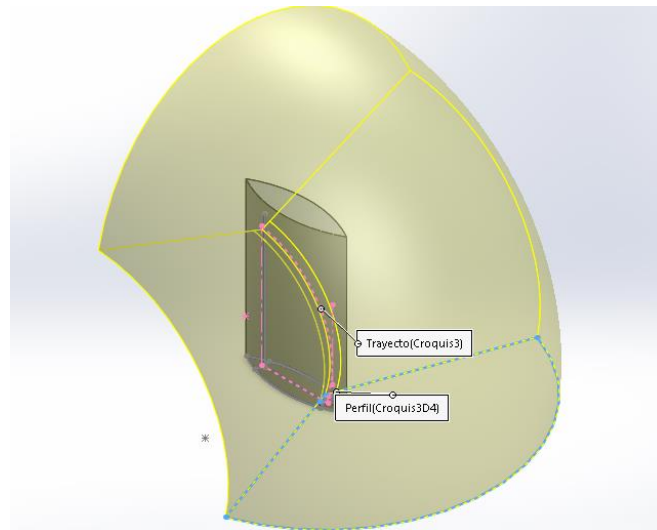


Figura 5.2: Extracció del material sobrant

Per finalitzar el model s'ha creat l'atri a partir d'un croquis en el pla horitzontal, a la mateixa alçada que on comença la vela.

Per a fer aquesta zona de l'edifici s'ha traçat un rectangle que es superposa amb la vela (figura 5.1), ja que el programa ho detecta com només un sòlid, facilitant així el disseny del croquis.

Seguint la mateixa metodologia que amb la vela s'ha extruït el croquis, però aquest cop en direcció vertical, sent d'aquesta manera un procés molt més senzill.

L'edifici consta d'altres elements menys importants i que es va considerar, després de parlar amb el tutor d'aquest treball que no tindrien un gran impacte en l'anàlisi que es volia dur a terme.

Aquests elements són entre d'altres: les escales i la terrassa ubicades en la part frontal o la W referent al nom de l'edifici en qüestió.

6. Introducció a l'anàlisi aerodinàmic

6.1 Conceptes bàsics de la mecànica de fluids.

En aquest apartat s'ha fet un petit resum d'alguns dels conceptes que s'han utilitzat al llarg d'aquest estudi, i que són importants a l'hora d'entendre com funciona el programa de simulació i per tant entrar les dades necessàries.

En la mecànica de fluids es diferencia la matèria en dos estats: líquid i sòlid. El que els diferencia és la capacitat de resistir un esforç tallant. En el cas del líquid, per petit que sigui el esforç tallant, es deformarà.

No obstant, el fet de que es deformin davant d'un esforç tallant no vol dir que tots els fluids es deformin de la mateixa manera. La variable que quantifica aquest fet és la viscositat, per tant cada fluid tindrà la seva pròpia viscositat.

El flux d'un fluid pot ser classificat segons diferents característiques, algunes d'elles són[3]:

- Flux compressible i no compressible.
- Flux laminar i turbulent.

Segons aquestes classificacions, el comportament del fluid pot ser molt diferent, per aquesta raó es important tenir en compte aquests fets. Per exemple en el programa que s'ha utilitzat, és important definir si el flux és turbulent o laminar.

Per a determinar aquestes característiques i el comportament del fluid s'utilitzen els anomenats nombres adimensionals, en concret per a les classificacions esmentades s'utilitza:

- Nombre de Mach per a saber si és compressible o incompressible.
- Nombre de Reynolds per a determinar si el flux és laminar o turbulent.

Nombre de Mach:

$$Ma = \frac{V}{V_s} \quad (\text{Eq. 6.1.1})$$

Sent:

V: la velocitat del flux $\left[\frac{m}{s}\right]$

V_s: la velocitat del so en el fluid $\left[\frac{m}{s}\right]$

Per a que sigui incompressible el nombre de Mach ha de ser inferior a 0,3. No obstant aquesta afirmació no és del tot certa, en realitat ho serà, però la variació serà tan petita que es considera menyspreable.

El nombre de Reynolds descriu el moviment del flux, relacionant els termes d'inèrcia i els viscosos, i com amb el nombre de Mach per a obtenir un nombre adimensional es necessita un quocient (veure Eq 6.1.2):

$$Re = \frac{u \cdot D \cdot \rho}{\mu} = \frac{u \cdot D}{\nu} \text{ (Eq. 6.1.2)}$$

Sent:

u : velocitat del fluid $\left[\frac{m}{s}\right]$

D : dimensió característica $[m]$

ρ : densitat del fluid $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

μ : viscositat dinàmica del fluid $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$

ν : viscositat cinemàtica $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

En el cas d'estudi serà important determinar quin tipus de flux hi haurà, es a dir, saber quina serà la capa límit, ja que com s'explicarà més endavant el programa només pot simular capa límit laminar o capa límit turbulenta.

Per a resoldre els diferents problemes que sorgeixen és molt important l'ús de la equació de la conservació de la massa (veure figura 6.1.1):

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{sist}} = 0 = \frac{d}{dt} \left(\int_{VC} \rho dV \right) + \int_{SC} \rho (\mathbf{V}_r \cdot \mathbf{n}) dA$$

Figura 6.1.1 : Equació de la conservació de la massa en un volum de control [2]

En aquesta equació es pot observar com la variació de la massa en funció del temps és igual a la derivada temporal de la massa dins el volum de control més la diferència entre la massa que entra i la que surten per les superfícies corresponents.

Si ens trobem en el cas que el flux és incompressible, la densitat serà constant. I si el flux és estacionari, la variació de la massa en funció del temps en el volum serà zero i per tant la equació ens quedarà reduïda de la següent manera (veure figura 6.1.2):

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 = \text{cte}$$

Figura 6.1.2 Equació de la conservació de la massa simplificada [3]

A l'hora de crear el volum de control, serà important recordar aquesta equació.

També s'ha de tenir present el desprendiment de la capa límit. Com es pot observar a la figura 6.1.3, el gradient de pressions pot ocasionar un canvi en el sentit de les velocitats del flux i això deriva en el desprendiment de la capa límit. Quan es dona aquesta situació es creen zones on el fluid realitza una espècie de recirculació on les pressions són inferiors (veure figura 6.1.4).

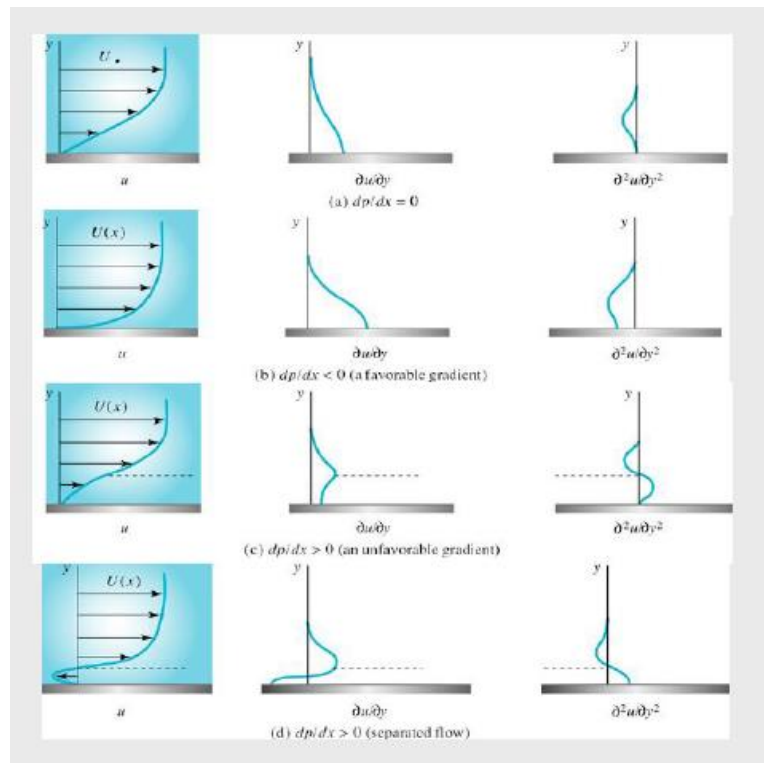


Figura 6.1.3 Distribució de velocitats en la capa límit en funció del gradient de pressions [4]

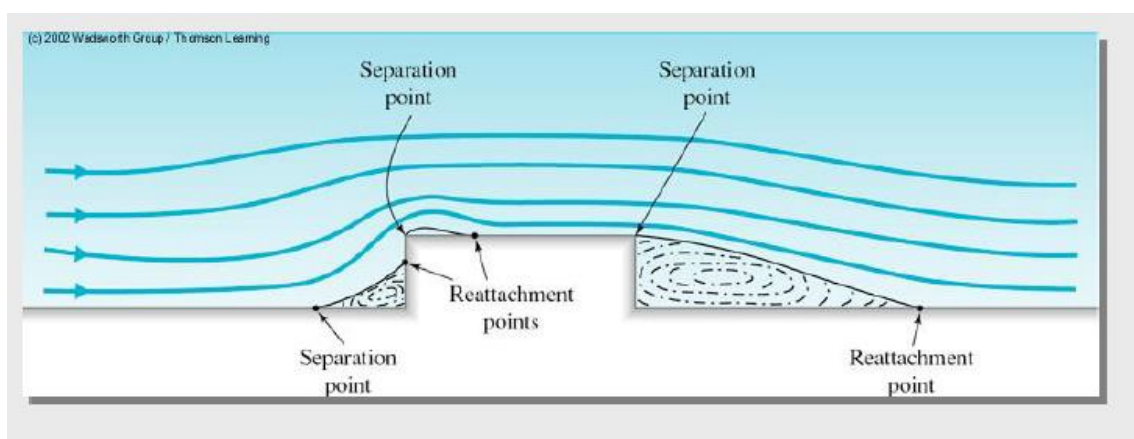


Figura 6.1.4: Desprendiment de la capa límit [4]

6.2 Estudi del vent en els edificis

En el moment de dissenyar l'estructura d'un edifici hi ha diferents factors que s'hi han de tenir en compte. I unes condicions necessàries i unes condicions desitjables[5].

Condicions necessàries:

- Equilibri: s'exigeix que l'edifici no es mogui, tot i que no és del tot cert, ja que en certes situacions es mourà, i el que es busca és que estigui controlat.
- Estabilitat: està relacionat amb el rang de moviments acceptables que pot tenir l'edifici.
- Resistència: és la capacitat dels materials, que s'utilitzen per a l'estructura, a suportar les diferents càrregues que serà sotmesa.
- Funcionalitat: es refereix a la influència que té l'estructura en l'espai delimitat.

Condicions desitjables:

- Econòmic: s'ha d'intentar fer un aprofitament òptim del material.
- Estètic: que resulti atractiva a la vista.

En el cas d'estudi, el vent està relacionat amb totes aquestes condicions, ja que com és evident totes estan relacionades entre elles.

El treball de l'enginyer és buscar la influència que tindrà el vent en l'edifici, i en com s'haurà de dissenyar l'estructura per a que compleixi els requisits mínims que estipula les diferents normatives del país on es construeixi, en aquest cas seria CTE [6].

En l'hotel W, al ser un edifici de grans dimensions i a l'estar aïllat, el vent encara hi té més importància.

No obstant, en aquest treball no s'entra en detall amb l'estructura ni es busca fer una proposta d'una possible millora en aquesta. El que s'ha estudiat és la influència que pot tenir l'orientació d'un edifici en les càrregues que rep a causa del vent.

Per a dur a terme aquest estudi no es necessita conèixer l'estructura que aguanta l'edifici, ja que hi depenen altres factors com la geometria de l'edifici, la velocitat del vent o la ubicació de l'edifici.

Amb l'ajuda de un programari CFD es buscarà la força que rebrà la estructura a causa del vent, depenent de l'orientació.

Per a trobar aquesta força (F_D) s'haurà de trobar abans el coeficient d'arrossegament C_D juntament amb l'àrea projectada de l'edifici en el pla perpendicular a la direcció del flux, la densitat del fluid i la velocitat del flux.

El coeficient d'arrossegament és molt complicat de trobar i per això s'utilitza normalment l'experimentació o utilitzant el mètode dels elements finits amb un programari CFD. Com ja s'ha comentat, en aquest treball s'utilitzarà la segona opció.

La fórmula que relaciona tots aquests termes és la següent:

$$F_D = C_D \cdot \frac{v^2}{2} \cdot A \cdot \rho \text{ (Eq.6.2.1)}$$

Sent:

v: velocitat del fluid $\left[\frac{m}{s}\right]$

A: dimensió característica [m]

ρ : densitat del fluid $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

C_D : Coeficient drag $\left[\frac{kg}{m \cdot s^2}\right]$

F_D : Força d'arrastrament [N]

Observant la fórmula es pot arribar a la conclusió que el que interessa es disminuir aquest coeficient d'arrossegament. Com que en aquest cas no es pot disminuir ja que l'objectiu no és canviar la geometria de l'edifici, el que s'ha fet és estudiar els diferents coeficients segons la direcció d'impacte del vent respecte l'edifici, i les direccions en que la velocitat del fluid és més alta.

Altres factors que poden ser importants en l'estudi de la mecànica de fluids en l'edificació són les possibles vibracions que es poden generar en l'estructura de l'edifici.

Per aquest motiu, es realitzen estudis modals ja sigui perquè el vent es mou en ràfegues o perquè es desprèn la capa límit creant una zona de vòrtex on hi ha una depressió.

Aquests fenòmens podrien fer que l'estructura a base d'armat col·lapsés si entrés en ressonància, o trencar els vidres (que en aquest edifici és una part molt important). No obstant no seran tractats en aquest estudi ja que en aquests casos es necessitaria un coneixement profund de l'estructura juntament amb una base teòrica de resistència de materials.

6.3 Estudi del vent en la zona d'estudi

Per a realitzar aquest estudi s'ha buscat informació segons les direccions del vent predominants a Barcelona, juntament amb les velocitats màximes que aquest assoleix.

Per a trobar aquestes dades s'ha d'agafar una estació de mesura la més propera al cas d'estudi per a que sigui el més fiable possible. En aquest cas, es té un punt de mesura en l'aeroport del prat.

Per a començar l'estudi s'ha analitzat la velocitat del vent mensualment [7] com es pot veure a la figura 6.3.1.

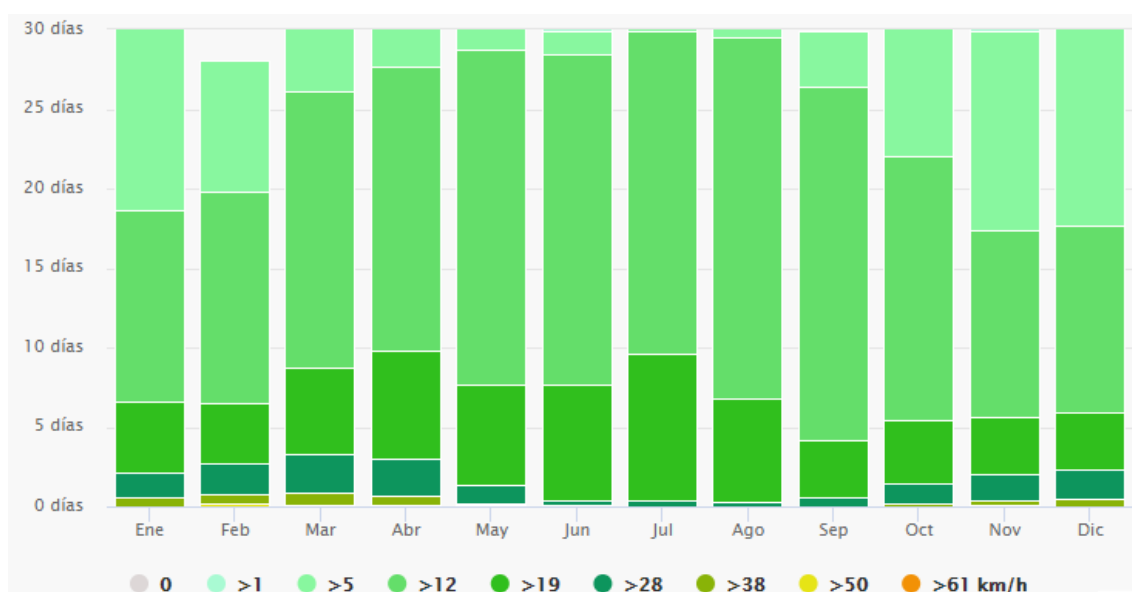


Figura 6.3.1: Distribució mensual de la velocitat del vent a Barcelona [7]

Aquest gràfic mostra quina és la proporció de cada mes dels diferents intervals. En la part inferior es pot veure la llegenda per colors que indica cada color a quin interval de velocitats correspon.

Tot i que el gràfic no mostri valors exactes de velocitats mitges o màximes, si que ofereix informació molt interessant.

En primer lloc es pot observar com la velocitat màxima de mesos com juliol i agost és inferior a de mesos com desembre i gener. No obstant les velocitats mínimes són superiors en els dos mesos d'estiu.

Aquest fet ha donat lloc a una petita reflexió sobre quins valors són interessants estudiar. En un primer moment s'havia raonat que en el cas d'estudi interessaven les velocitats màximes, ja que es busca el cas crític que haurà de suportar l'estructura. Tot i així, en aquest estudi es busca trobar una orientació en que l'edifici sigui més aerodinàmic, per tant s'ha considerat que no serà tant important la velocitat màxima que s'assoleix, si aquesta només es presenta en un mes en concret i durant una petita fracció de dia.

En altres paraules, potser que la velocitat màxima s'hagi donat en un dia determinat a l'any i en una direcció en la que normalment no incideix el vent, i això pot significar que aquesta velocitat sigui puntual i no es doni l'any següent. Per tant s'han considerat com a velocitats màximes aquelles que tenen lloc un mínim d'un 5%.

A continuació s'ha buscat en quina és la direcció predominant del vent, ja que a partir d'aquestes direccions es buscarà com d'aerodinàmic és l'edifici i si orientant-lo d'una altra manera obtenim una disminució d'aquest valor.

A la figura 6.3.2 es pot observar la rosa dels vents de 16 punts a Barcelona:

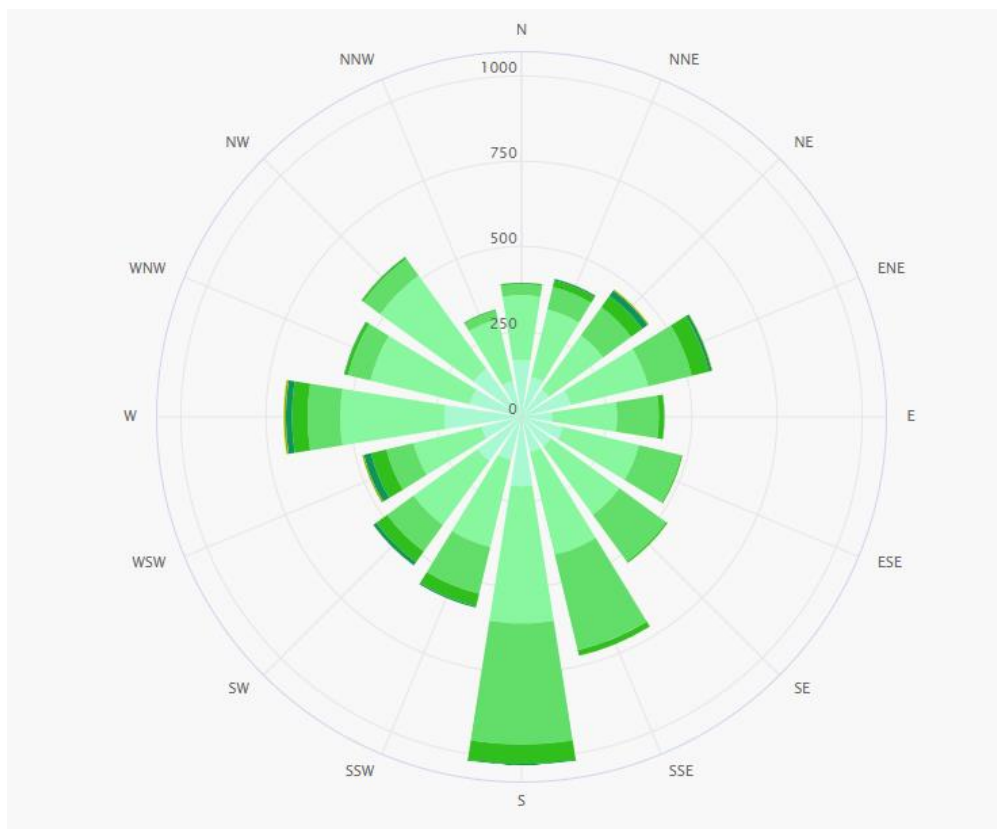


Figura 6.3.2: Rosa dels vents a Barcelona [7]

Amb l'ajuda de la rosa dels vents s'ha observat que el vent prové generalment del Sud-Sud-Est, de l'Oest i del Sud. Per a facilitar la feina s'ha simplificat els dos casos principals en Sud i Oest.

A més a més en aquest gràfic també es pot trobar informació de la velocitat en la que es presenta el vent. Seguint el raonament fet abans, s'agafaran les velocitats màximes que es donen lloc en més de un 5% dels dies.

Així doncs s'obté una velocitat aproximada de 10 m/s. En l'estudi que s'ha realitzat, aquesta velocitat s'ha imposat constant, i per tant només s'ha anat modificant la orientació de l'edifici.

Un cop trobades les diferents direccions per on el vent impacta amb l'edifici, s'ha procedit a buscar l'orientació real de l'edifici segons les direccions cardinals, és a dir, veure com estan situades les diferents cares respecte el Nord, Est, Oest i Sud ja que les direccions del vent s'han trobat respecte aquesta referència [8].

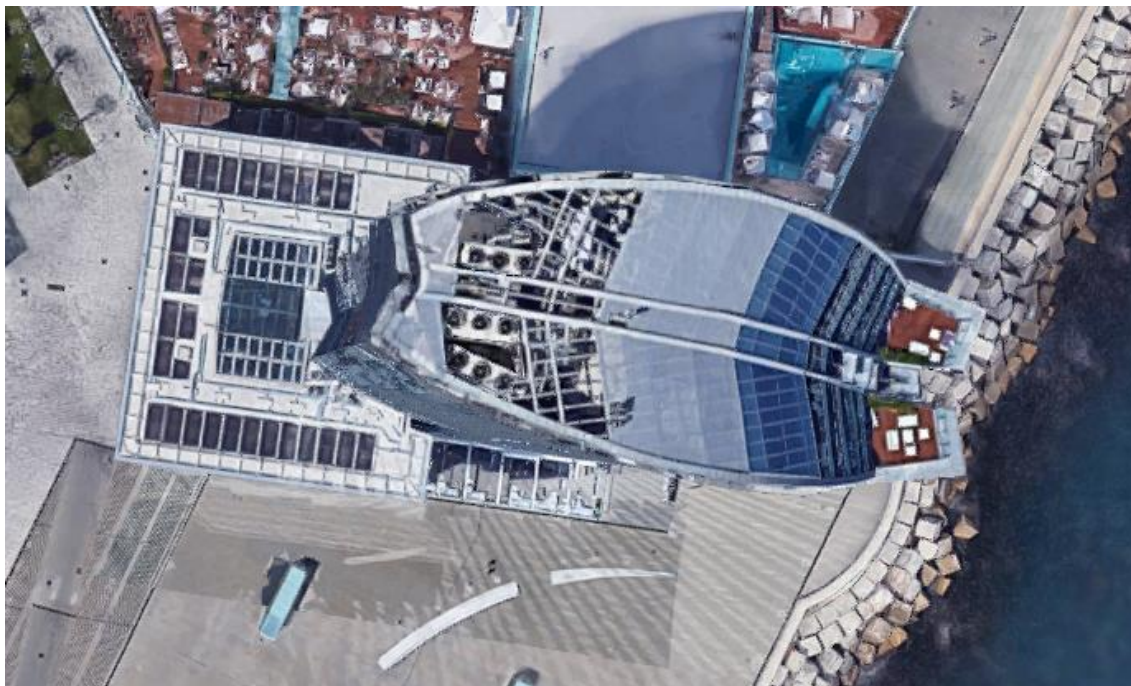


Figura 6.3.3: Vista superior de l'edifici orientat segons els eixos cardinals [8]

Com es pot apreciar a la figura 6.3.3 la façana frontal (la que té la terrassa) està orientada pràcticament a l'est. Per acabar de definir exactament l'orientació, s'ha agafat la imatge i tenint en compte que el nord-sud és l'eix vertical i l'est-oest forma el horitzontal s'ha mesurat quin angle forma exactament.

Per a realitzar aquesta mesura s'ha utilitzat el programa solidworks, que disposa d'una eina per importar imatges. Així doncs s'ha dibuixat dues línies, una horitzontal i l'altra que va des de la terrassa de la vela fins l'atri. El resultat obtingut és de 10,21°, per a facilitar els càlculs s'agafarà 10°.

7. Introducció al programari Ansys Workbench

L'Ansys workbench , és un programa d'Ansys Inc que incorpora tots els altres programes d'aquesta companyia. En el cas d'estudi s'utilitzarà el referent a CFD. El workbench de Ansys ofereix una interfície molt més intuïtiva facilitant el seu ús als usuaris principiants.

En aquest apartat s'introduirà breument els diferents blocs en els que es divideix el programa, que seran explicats amb més profunditat paral·lelament amb les simulacions que s'han realitzat.

Com en qualsevol tipus de programari de CFD, es divideix en tres parts:

- *Preprocessor*: és la part del programa on s'introdueix tota la informació necessària per a realitzar els càlculs.
- *Solver*: és la part del programa que s'encarrega d'agafar les dades introduïdes i amb el mètode dels elements finits juntament amb les diferents equacions del programa, realitza una simulació del que passa en el model realitzat.
- *Postprocessor*: En aquesta part l'usuari pot visualitzar els diferents resultats de diferents formes.

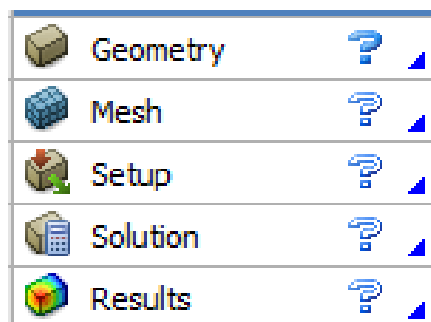


Figura 7.1: Divisions del programari Ansys Workbench, CFX

En la figura 7.1 es pot observar els diferents blocs en que es divideix el programari CFD que s'ha utilitzat. Els tres primers blocs formen part del *Preprocessor*, el quart del *solver* i l'últim del *postprocessor*.

7.1 Preprocessor:

7.1.1 Geometry:

En aquest apartat, com ve diu el seu nom, es crea o importa el disseny geomètric del cas que es vol estudiar. Per un costat es crea la geometria del model, per exemple en el cas d'estudi s'ha importat l'hotel que s'ha dissenyat amb sòlidworks, i per l'altre costat s'ha de crear un volum de control que tingui la geometria necessària per les

condicions de contorn que li volem aplicar i a més que tingui les dimensions adequades.

7.1.2 Mesh

En l'apartat *Mesh* es crea la malla, fet molt important ja que depèn en gran mesura de la fiabilitat dels resultats. La mida dels elements haurà de ser suficientment petita en funció de la regió en la que es trobin per a donar uns resultats fiables. No obstant la millor opció no és fer els elements el més petit possible, és a dir amb el màxim d'elements que el programa permeti, ja que si és crea un model amb un gran nombre d'elements, s'estarà augmentant la dificultat de càlcul pel solucionador. Aquest fet pot desencadenar en una simulació que requereixi molt de temps, cosa que no ens interessa si es necessiten fer unes quantes simulacions. Per tant s'haurà de dissenyar un mallat suficientment petit per al nostre objectiu sense sobrecarregar-lo d'elements.

7.1.3 Setup

El *setup* és l'apartat en el que s'imposen les diferents condicions de contorn, entre altres s'imposen:

- Característiques de les diferents superfícies del volum de control. S'ha d'assignar per quina superfície entra el fluid, per quina surt, les possibles simetries del model o si són parets amb lliscament, sense...
- Tota la informació que el programa necessiti de fluid, com quina densitat té, a quina velocitat entra o quina viscositat té. És possible que el fluid que s'estudia ja tingui assignat aquests valors, ja que el programa disposa de diversos fluids definits.
- Tipus d'anàlisi que es desitja realitzar, com estacionari o transitori. En el primer cas no s'haurà d'afegir res més, en canvi en el segon s'haurà de importar abans una solució del seu propi estacionari, per a iterar a partir d'aquest, a més s'haurà d'afegir informació com el temps entre mostres.
- Assignació dels *monitor points*. Aquesta opció no és obligatòria ja que no canviarà el resultat obtingut. No obstant és interessant afegir els *monitors points* ja que permeten veure l'evolució de determinades variables a mesura que el *solver* va iterant, ja que mostra en pantalla el valor a cada iteració i es pot observar si convergeix i quin error relatiu entre les últimes iteracions.

7.2 Solver

El *solver* d'aquest programa compren només l'apartat *Solution*, en aquest apartat se li haurà de concretar fins quan ha d'iterar. Se li imposaran dos condicions i parará d'iterar un cop compleixi una d'elles.

Per una banda s'imposarà el valor de residu mínim que es pugui acceptar, és a dir el nombre d'iteracions màxim que es vol realitzar, o a partir de quin valor de residus s'acceptarà la solució obtinguda. Per altra banda s'imposarà el nombre de simulacions. Aquesta condició tot i semblar en un primer moment innecessària ja que no s'arriba al resultat, és molt important. A l'imposar un nombre màxim d'iteracions el que es fa és evitar que si pel que fos no convergeix o li costa molt degut a la seva complexitat, el programa deixi d'iterar i no es passi moltes hores. Quan passa això es millor modificar el mallat o les condicions de contorn abans que esperar a que s'arribi a una solució amb més nombre d'iteracions.

7.3 Postprocessor

En l'apartat *results* es podrà visualitzar el diferents resultats de les variables del problema en forma de gràfics, taules o visualitzacions en 2D i 3D.

Apart de les variables que proporciona el programa com la velocitat o la pressió, també es poden crear variables. Per a fer-ho s'ha de imposar les diferents equacions necessàries, agafant les variables que el programa ha calculat.

8. Simulació del cas d'estudi amb programari CFD

Com ja s'ha comentat, gràcies a les simulacions realitzades amb el programari CFD es pretén trobar el C_D en funció de l'angle d'incidència del vent.

En un primer moment s'ha establert cinc simulacions que són importants per a les conclusions a les que es volia arribar, no obstant com s'explicarà mes endavant, s'ha hagut de realitzar més d'una simulació per a un mateix cas per a fer certes comprovacions.

Per una banda s'ha fet dos simulacions amb l'orientació amb la que es troba l'edifici a la realitat, en concret, com li afecta la entrada per l'oest i pel sud, ja que són les direccions per on s'ha trobat que hi entra amb més freqüència.

Per l'altra banda s'ha realitzat tres simulacions en unes direccions respecte l'edifici que s'han trobat importants, per a després extreure conclusions i possibles solucions. Les direccions són: perpendicular a la cara on es troba la terrassa principal, i les altres dues a 45 i 90 respectivament de la primera (veure figura 8.1).

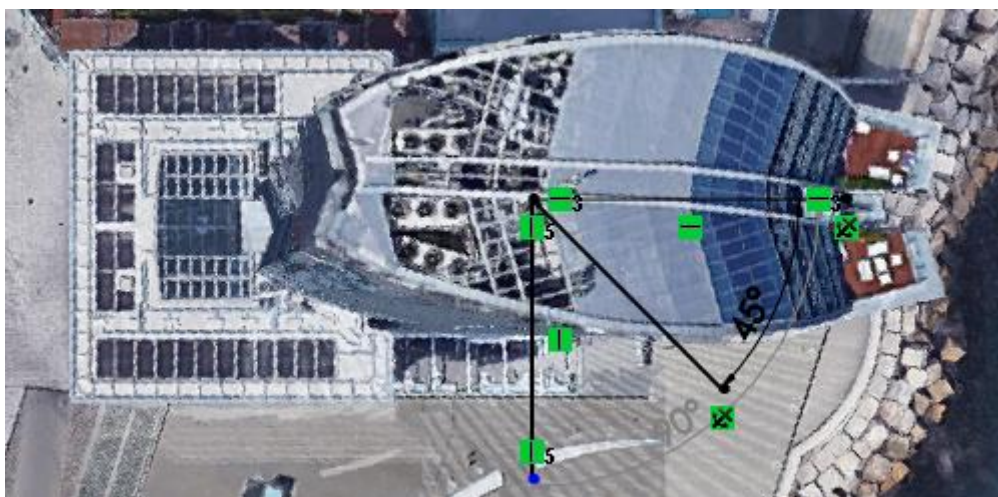


Figura 8.1: Direccions del flux estudiades

Per saber de quina simulació es tracta quan s'estiguin analitzant s'han codificat respectivament com: Oest, Sud, 0°, 45° i 90°.

Per a realitzar la explicació del procediment realitzat, de les dades introduïdes, les suposicions realitzades o explicacions dels passos, s'ha agafat una direcció en concret. Les altres direccions s'explicaran menys profundament, comentant breument les dades més importants i les modificacions que s'han realitzat.

Per tant s'agafarà la simulació de 0° com a referència i s'explicarà amb detall els passos seguits, per a fer-ho es seguirà l'estructura de l'apartat 4 Introducció al programari Ansys Workbench.

8.1 Simulació orientat a 0°:

8.1.1 Geommetry:

Per a realitzar aquest apartat, primer s'ha de determinar quin és el volum de control desitjat.

Cal tenir present la interacció que tindrà el terra amb el vent, ja que aquest actuarà com una placa plana. Per a dur a terme aquesta simulació s'ha imposat una velocitat constant U_∞ , i per tant la superfície de sortida hauria de ser superior a la d'entrada.

Per a il·lustrar aquest fet, s'ha agafat el cas de placa plana. En el cas d'estudi, el fet d'haver-hi un edifici encara distorsionaria més el Volum de control.

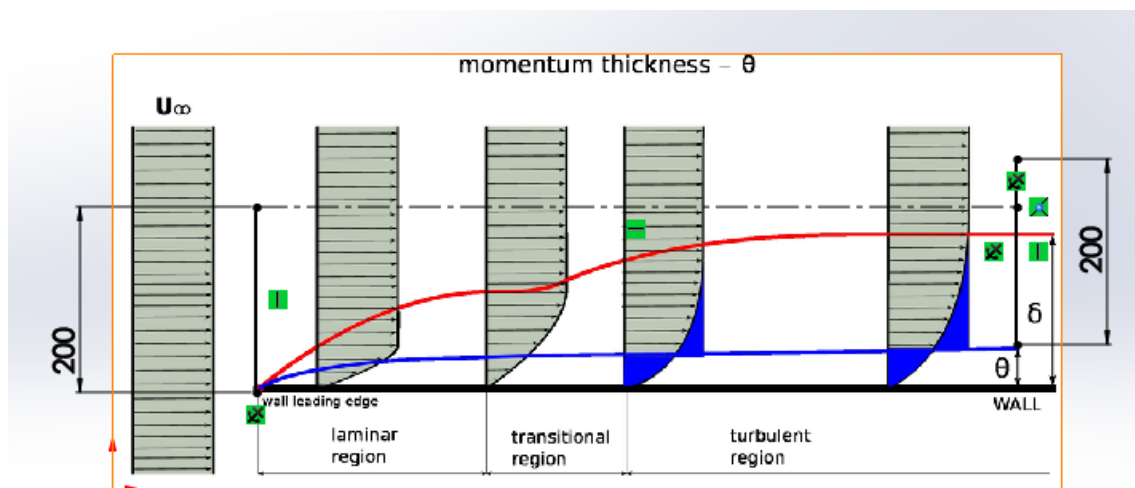


Figura 8.1.1.1: Capa límit en placa plana [9]

Com es pot observar en la figura 8.1.1.1, entra una velocitat U_∞ per sobre de la placa plana, aquesta placa crea una zona on la velocitat és inferior a la d'entrada, amb l'equació de la continuïtat deduïm que la superfície de sortida hauria de ser superior a la d'entrada i per tant si creéssim un volum de control amb les mateixes àrees, s'estaria distorsionant els resultats.

El gruix de desplaçament és la variable amb el que es mesura com s'hauria de canviar l'àrea de sortida. Per a trobar-la s'utilitza la equació de continuïtat:

$$\dot{v} = \int_0^\infty u dy = U \int_\delta^\infty dy;$$

En placa plana en l'eix perpendicular al flux i en el pla horitzontal, el perfil de velocitats no variarà. Per tant s'integrarà el perfil de velocitats en funció de y , es a dir l'eix vertical seguint la figura 8.1.1.1. A l'equació anterior es pot observar com el perfil de velocitats en una zona on s'hi trobi capa límit, és pot igualar a una velocitat constant però amb

diferent alçada, en concret δ unitats menys. Per tant l'altura de la superfície de sortida hauria de ser la mateixa que la de l'entrada més $\delta(x=\text{longitud total de la placa plana})$.

Així doncs en la figura 8.1.1.1 si es volgués crear un volum de control per poder satisfer les condicions del problema, el volum de control hauria de tenir una alçada $h=h_0 + \delta(x)$, sent h_0 l'alçada a l'entrada, i $\delta(x)$ el gruix de desplaçament en funció de x .

No obstant com ja s'ha comentat, en el cas de tenir a més a més un edifici el problema es torna casi impossible. Per a trobar-ho s'hauria de realitzar un estudi profund de les diferents capes límits que es formen en les superfícies.

Per aquest motiu una possible solució es crear un ortoedre suficientment gran per a que l'error que es genera al no tenir el volum de control adequat, sigui menys important.

Quan es calcula un edifici es recomana que si té amplada W i alçada h , el volum de control ha de medir: $5h \times 10W \times 12h$. Com es pot observar a la figura 8.1.1.2[10].

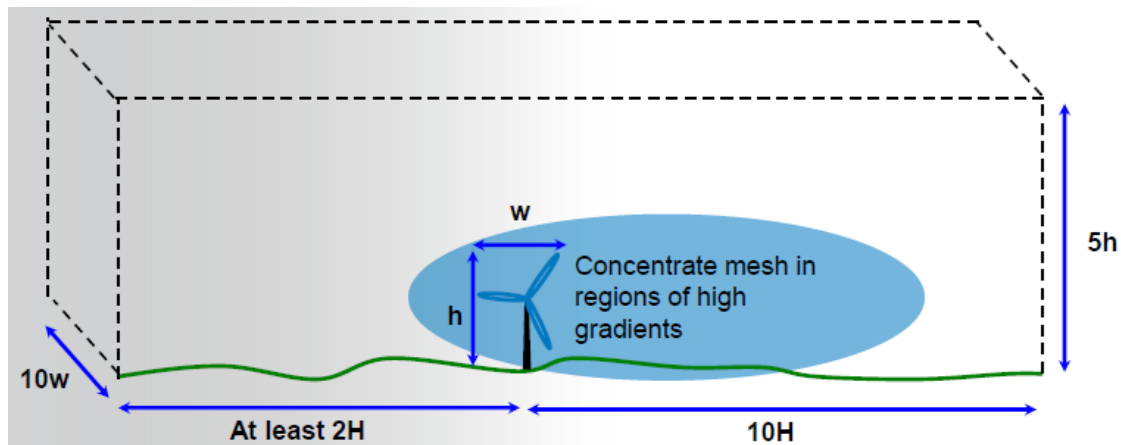


Figura 8.1.1.2 : Mides del volum de control recomanat en un cas d'estudi similar al d'aquest TFG [10]

Fixant-se en la figura 8.1.1.2 es pot observar com la distància de l'entrada (superfície esquerra) a l'edifici és superior a la de l'edifici a la sortida. Això es degut a que la capa límit es desprèn. En la figura 8.1.1.3 es pot observar la importància d'augmentar la mida del volum de control quan passa aquest fenomen.

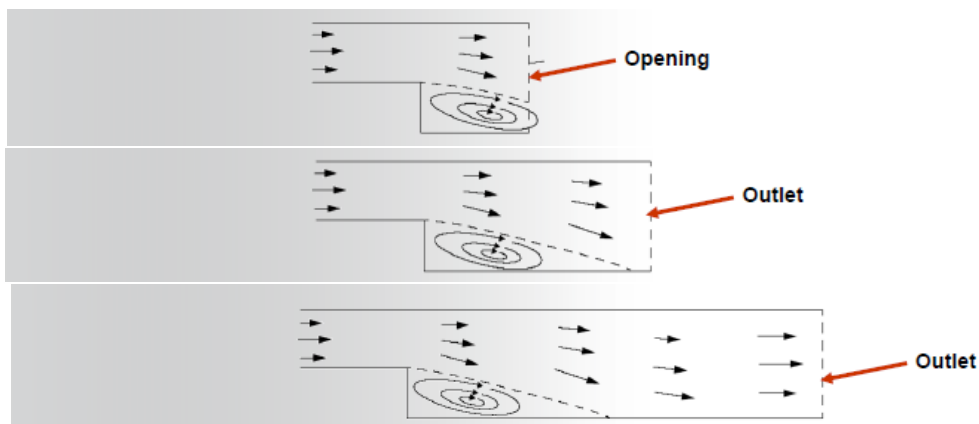


Figura 8.1.1.3: Diferents volums de control per a un mateix cas [10]

Seguint les indicacions de la figura 8.1.1.2, el volum de control resultant en el cas d'estudi és d'aproximadament 400 x 300 x 960.

No obstant, el tutor d'aquest TFG va aconsellar no utilitzar un volum de control tan elevat, ja que segurament amb un de 2h x 2h x 4h, tot i que el error seria més elevat continuaria sent negligible. Per a estar segurs, es va arribar a la conclusió que es realitzés la comprovació en la primera simulació (la de 0º) realitzant-la amb els dos volums de control citats. Si els resultats eren coherents, les següents simulacions es realitzarien amb el volum de control reduït. No obstant en totes les simulacions es comprovaran els resultats, i si aquests no són coherents es procedirà a augmentar el volum de control.

Com que en el cas de 0º, hi ha una simetria en l'edifici, es podria simular només la meitat del model i del volum de control. Amb aquesta simplificació s'aconseguiria facilitar els conseqüents càlculs realitzats pel programa el càlcul, no obstant com és el cas que necessitava un volum de control més petit, s'ha optat per no fer aquesta simplificació.

Per a generar el volum de control en primer lloc s'ha creat, amb el propi editor que proporciona el workbench, un pla que compleix les condicions de profunditat i alçada, seguidament s'ha procedit a extruir aquesta superfície.

En el cas del volum simplificat no s'ha tingut cap problema, i per a tenir nombres rodons, s'ha arrodonit a l'alça, quedant finalment un VC de 200x200x400 (veure figura 8.1.1.4).

En canvi el volum de control del model recomanat s'ha fet de 400 x 300x 620, ja que el programa no permetia fer-ne un amb més profunditat.

Finalment per a obtenir el model desitjat, s'ha realitzat una operació booleana, aquesta consisteix en extreure el volum de l'hotel a l'ortoeidre, d'aquesta manera es crea una regió dins el volum de control en la que el flux no pot travessar i per tant es veurà modificades les trajectòries de les partícules, emulant així el comportament de l'aire impactant amb l'edifici.

Per a facilitar els següents apartats de la simulació s'ha anomenat cada superfície en funció de les condicions de contorn del problema:

- Inlet: Superfície per la que entra perpendicularment el fluid al VC.
- Outlet: Superfície per la que surt el fluid del VC.
- Wallt: Superfície que actuarà com a sòl.
- Wallmv: Superfícies laterals i superior per al qual passa el fluid V_{∞} tangent.
- Wallhv: superfície resultant d'extreure l'hotel del volum de control.

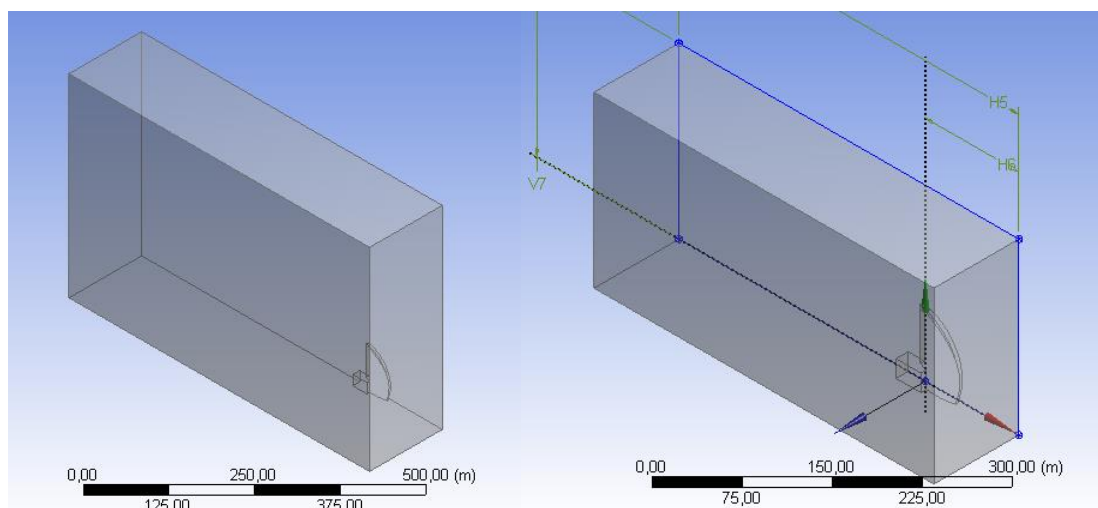


Figura 8.1.1.4: Volums de control per a la primera simulació

En aquesta simulació el volum de control reduït ha estat suficient ja que les velocitats i les pressions a les zones properes a les superfícies laterals i superior s'han mantingut molt similars a les de l'entrada.

8.1.2 Mesh:

8.1.2.1 Importància del mallat i factors a tenir presents

Com ja s'ha comentat, el mallat compleix una funció molt important en la simulació, i en conseqüent s'ha de donar molta importància, raonant en quins llocs és necessita una mida d'element més petit o en quins llocs no ho es tant.

Com que no es disposa de temps infinit, ni tampoc número d'elements infinit ja que el programa té una limitació, s'ha d'intentar simplificar el màxim la malla per a reduir el temps de càlcul, però assegurant-se de que els resultats siguin coherents.

Així doncs, s'ha estudiat en quines zones és més important tenir una mida d'element petit i en quines no tant. Per començar, en les superfícies on s'hi troba fricció s'haurà de realitzar un mallat més precís degut a la capa límit. Com s'ha explicat anteriorment, en l'interior de la capa límit s'hi troba grans variacions de velocitat per distàncies petites. En canvi, en superfícies on el flux estigui lliure no serà necessari disposar d'una malla tant precisa.

La variable Y^+ serà de gran ajuda per a explicar la importància de la mida d'element en la capa límit.

Aquesta variable indica la mida mínima que ha de tenir la primera cel·la en que trobem capa límit, fet molt important ja que com es pot observar a la figura 8.1.2.1.1, el fet de posar una mida massa gran pot generar una distorsió elevada del que passa entre la superfície i el fluid. A l'esquerra de la imatge es pot observar un mallat insuficient i per tant no és igual que el de la dreta, que gràcies a tenir una mida d'element inferior simula millor el comportament del fluid.

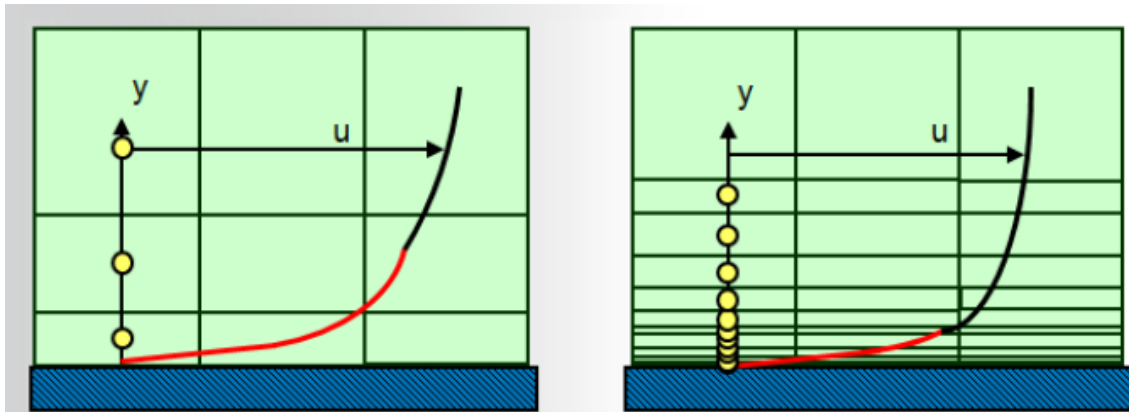


Figura 8.1.2.1.1: Representació de la capa límit segons el nombre d'elements[11]

No obstant, com que aquesta variable mesura la mida mínima que ha de tenir l'element més pròxim a la capa límit i la capa límit va variant al llarg de les superfícies, no s'ha intentat calcular-la. Aquesta variable ha servit per a entendre la importància de refinar en les zones properes a l'edifici.

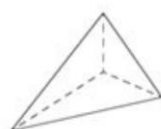
Un altre fet a tenir present és la separació de la capa límit, com ja s'ha comentat, el volum de control és superior en la part del darrere, no obstant no només ha de constar d'una regió suficientment gran, també s'ha de refinar ja que hi haurà canvis més bruscs de velocitats i pressions que per exemple en la zona pròxima a la superfície superior del VC.

Per tant, les zones ens les que s'ha donat més importància a l'hora de mallar són:

- L'edifici degut a la capa límit, i perquè és l'objecte d'estudi
- El sòl per la capa límit.
- La part del darrere i una mica els laterals de l'edifici per la separació de la capa límit, i els canvis bruscs de les propietats del flux.

Cal destacar que la mida de l'element no és l'únic aspecte que ajuda a millorar els resultats de les simulacions. El tipus d'element també pot canviar la qualitat dels resultats.

Pel que respecta al tipus d'element en simulacions en 3D hi ha dos tipus d'elements a destacar: per una banda els tetraedres i per l'altra els hexaedres. La gran diferència entre aquests radica en el nombre de nodes en un mateix element. El tetraedre està format per 4 nodes mentre que l'hexaedre està format per 8, sent doncs l'hexaedre més precís en molts casos. Cal mencionar que no sempre serà així ja que també influeix la qualitat dels elements de la malla.



Tetrahedrons



Hexahedrons

Figura 8.1.2.1.2: Tipus d'elements de la malla [12]

La qualitat dels elements de la malla està molt relacionada amb la forma que tenen. Com es pot observar en l'equació 8.1.2.1.1 la qualitat és funció del volum i de la mida dels costats. Aquest valor es comprén entre 1 i 0, sent 1 el valor òptim de qualitat. Per tant com més diferents siguin els costats entre ells, menys qualitat tindrà l'element. La constant C varia segons el tipus d'element del qual es calcula la qualitat [13].

$$Quality = C \left[volume / \sqrt{[\sum (Edge\ length)^2]^3} \right] \quad (Eq:8.1.2.1.1 [13])$$

Un cop estudiat una mica la importància dels diferents factors que hi intervenen, s'ha procedit a intentar plasmar-ho en el model d'estudi.

Al començament es va trobar raonable fer un disseny senzill i anar refinant poc a poc, per una banda s'ha pogut observar com els valors anaven apropant-se cada cop més i per l'altre s'ha estalviat fer un disseny massa complex des del principi. Aquesta metodologia ha estat còmoda ja que en els últims mallats ja començava ser elevat el temps de creació d'aquest i la posterior simulació. Si des d'un principi es fa un mallat excessivament complex, es pot donar la situació en que s'estigui fent un mallat amb un nombre molt elevat d'elements innecessaris. Per tant és més eficient començar amb pocs elements i anar augmentant aquest nombre, que fer-ho a la inversa.

Per a comprovar si la malla ja estava suficientment refinada o si per contra s'havia de millorar, s'ha utilitzat la pressió màxima. La pressió del punt d'estancament és:

$$P = \frac{1}{2} v^2 \rho = 59,3 \text{ Pa}$$

Per tant la pressió màxima teòrica resultant del punt d'estancament, haurà de ser aproximada a 60 Pa.

8.1.2.2 Mallat del cas d'estudi

Un cop es va començar a crear malles més refinades van anar sorgint diferents problemes.

Quan s'intentava crear una zona amb *Inflation* el programa no aconseguia arribar a una solució. Per tant, es va optar per realitzar una bifurcació en la creació de la malla. Per una banda es va crear un mallat amb tetraedres i amb *Inflation*, i per l'altra es va crear un mallat amb hexaedres, en ambdós casos es va anar refinant la malla fins a trobar uns resultats coherents

En la malla de la figura 8.1.2.2.1 es pot observar el mallat amb tetraedres.

Per a intentar complir els requisits mencionats anteriorment, s'ha aplicat dos condicions per al mallat:

- *Inflation* al voltant de la superfície corresponent a l'edifici.
- *Body sizing*: serveix per a fer elements d'una mida respecte una superfície i fer-los augmentar a mesura que s'allunyen d'aquesta. La superfície a partir de la qual s'ha fet créixer és la corresponent al sòl.

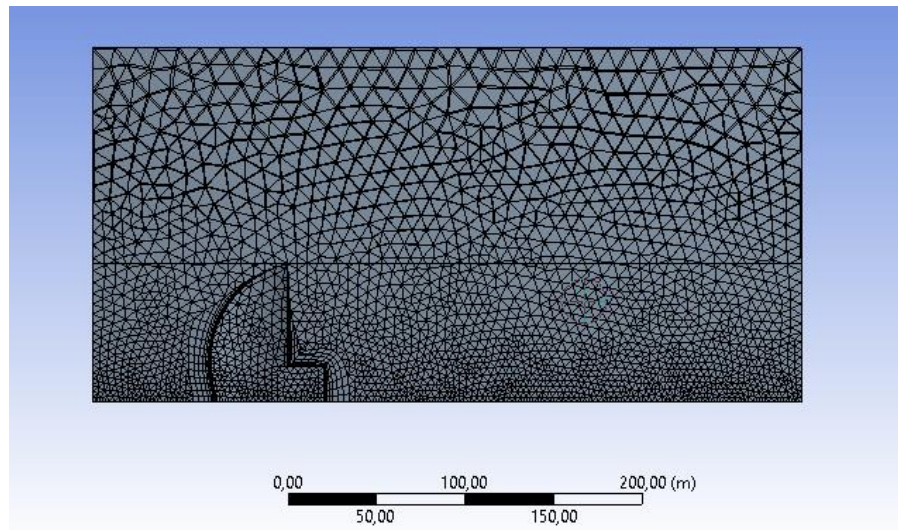


Figura 8.1.2.2.1: Mallat amb tetraedres

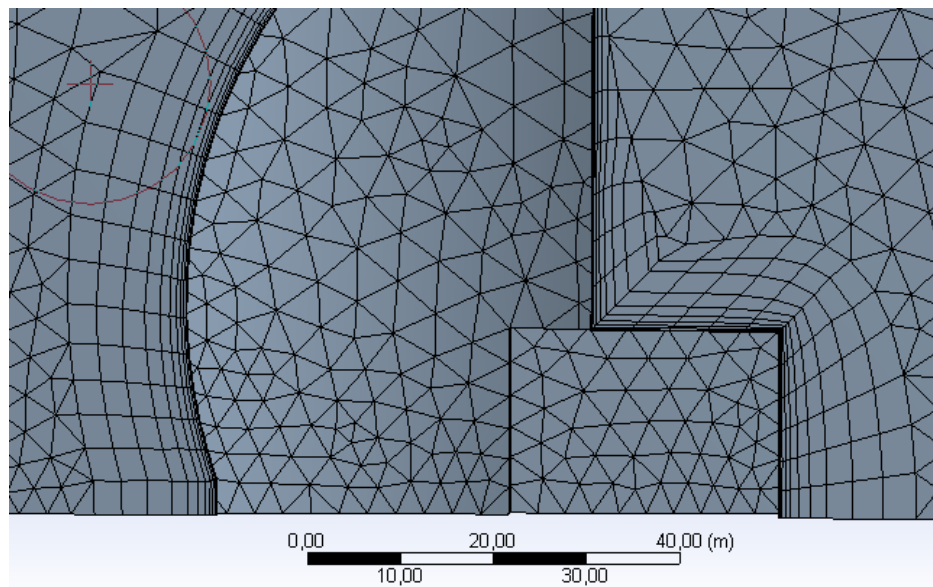


Figura 8.1.2.2.2: Zona amb inflation del mallat amb tetraedres

En la figura 8.1.2.2.3 es pot observar el mallat amb hexaedres.

Com en el cas anterior, s'ha aplicat diverses condicions per a què el mallat sigui semblant al que es vol arribar:

- *Hex dominant method*: serveix per a imposar que s'utilitzin principalment hexaedres.
- *Body sizing* per a imposar una mida menor, aplicat al sòl
- *Body sizing* aplicat a l'edifici

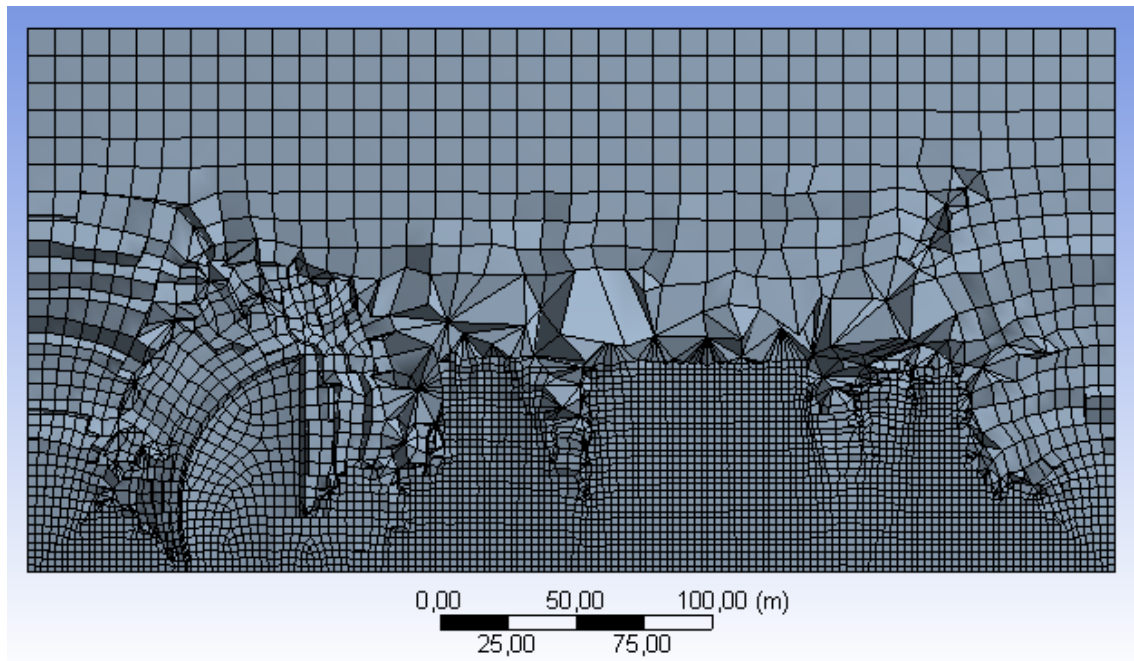


Figura 8.1.2.2.3: Mallat amb hexaedres

<input type="checkbox"/> Nodes	68283
<input type="checkbox"/> Elements	362219

Figura 8.1.2.2.4: Nombre de nodes i elements en el mallat amb tetraedres

<input type="checkbox"/> Nodes	247444
<input type="checkbox"/> Elements	280075

Figura 8.1.2.2.5: Nombre de nodes i elements en el mallat amb hexaedres

En ambdós casos es pot observar com el nombre d'elements és similar, no obstant en el segon cas el nombre de nodes és superior.

Pel que respecta a les qualitats, com es pot observar en les figures 8.1.2.2.6 i 8.1.2.2.7 la qualitat dels elements en la malla formada per hexaedres és en general molt més alta que la dels tetraedres. A més cal destacar dos fets que criden molt l'atenció, per una banda la qualitat dels elements en la superfície de l'edifici i per l'altra la qualitat mínima.

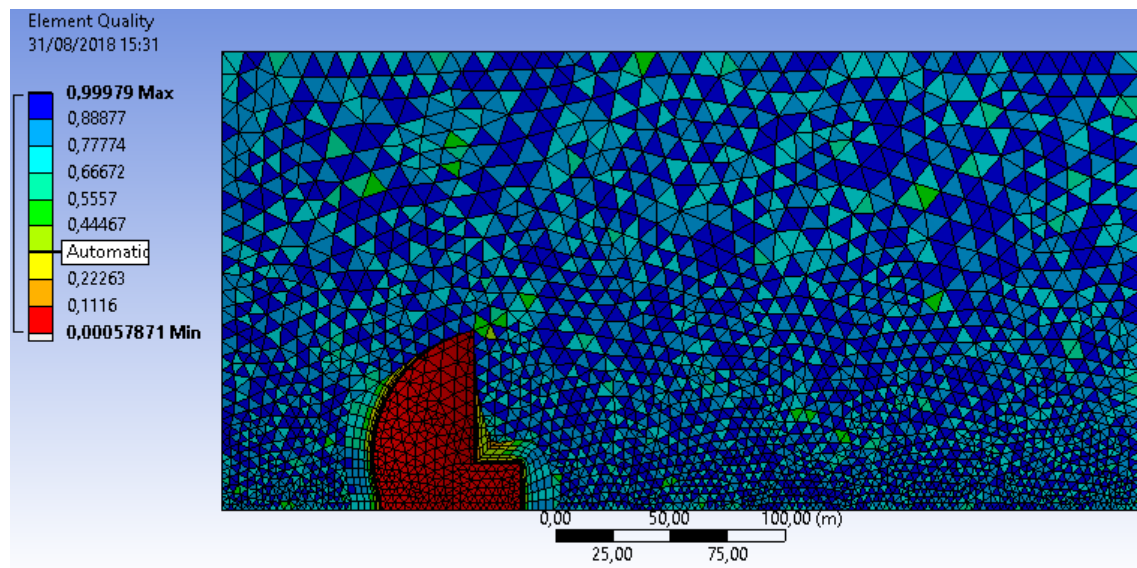


Figura 8.1.2.2.6: Qualitat dels elements en el mallat amb tetraedres

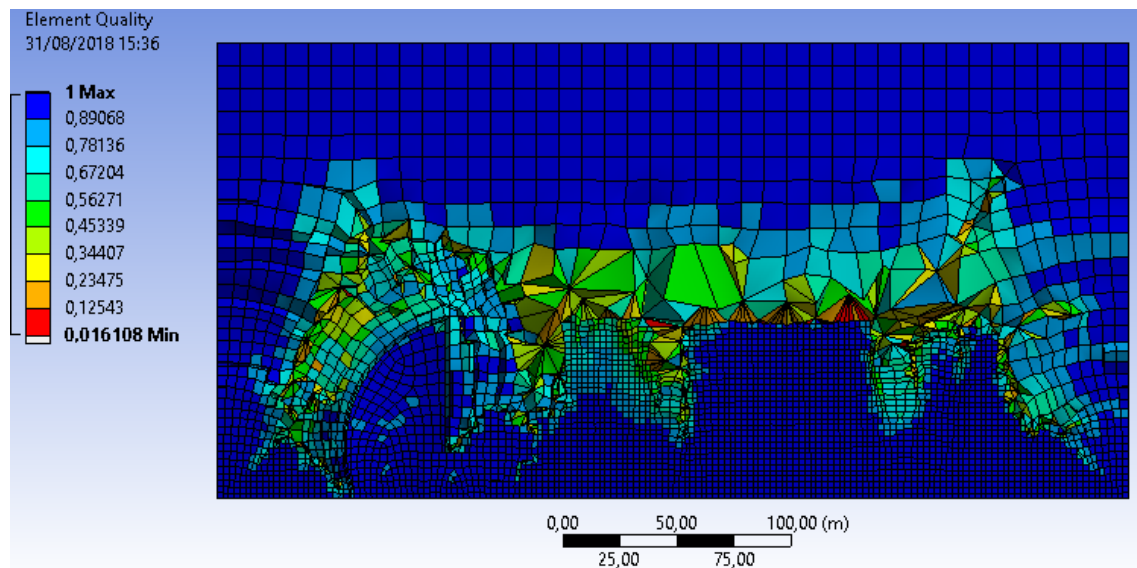


Figura 8.1.2.2.7: Qualitat dels elements en el mallat amb hexaedres

Pel que respecta a la qualitat dels elements que es troben en la superfície de l'edifici, es pot veure clarament com en el mallat format per tetraedres és molt baix, en canvi en la malla formada per hexaedres la qualitat es pràcticament 1 en la majoria d'elements en contacte amb la superfície, i a més sent la qualitat mínima d'aquesta regió bastant elevada.

En quant a la qualitat mínima, es pot observar com en el cas d'hexaedres és superior al mallat format per tetraedres, aproximadament 27 vegades més.

Amb aquestes dades el primer que es pensa es que la malla amb hexaedres és més fiable, però s'ha comprovat els resultats per a treure conclusions fiables.

Al fer les simulacions es va trobar una pressió màxima de 65,25 Pa amb el mallat format per hexaedres i 65,82 Pa amb l'altre mallat, per tant es va considerar que la malla formada per hexaedres era la més convenient a utilitzar.

Amb el valor de 64,4 Pa, s'obté un error relatiu a la pressió esperada de 60 Pa, de 7%. En aquesta simulació s'ha donat per vàlida la malla. També cal mencionar que en aquest apartat s'ha utilitzat el volum de control recomanat pel tutor d'aquest TFG, per tant també es pot donar per vàlid aquestes dimensions. No obstant, com s'explicarà en l'apartat de resultats, els volums de control i les malles s'han hagut de modificar depenent de les simulacions.

8.1.3 Setup

En aquest apartat s'ha aplicat les condicions de contorn, les característiques del fluid i del flux juntament amb detalls sobre el solver.

8.1.3.1 Analysis Type

Per a realitzar la simulació primer s'ha de triar quin tipus d'anàlisi es vol dur a terme. En el cas d'estudi, s'ha fet una anàlisi en estacionari. Cal mencionar que al haver-hi zones on es separa la capa límit, a la realitat no hi haurà un flux estacionari ja que hi haurà zones on el fluid recircularà, creant oscil·lacions en pressions i velocitats. En concret la zona del darrere de l'edifici serà un punt conflictiu. No obstant aquestes variacions no es consideraran importants en l'estudi que es realitza.

8.1.3.2 Default Domain

En aquest apartat s'ha imposat la localització del domini, en aquest cas el volum de control. També s'ha definit que el domini a estudiar és un fluid.

La pressió de referència s'ha imposat 1 atm que és el valor que trobem en l'atmosfera, cal mencionar que si es troben valors negatius de pressió en els resultats es degut a la pressió de referència. Per saber la pressió absoluta s'haurà de sumar els valors a la pressió de referència.

Pel que respecta al fluid s'ha agafat l'aire a 25 °C, ja que és en l'estat en el que es vol estudiar. Per a comprovar els valors de les diferents variables que defineixen al fluid es pot entrar a la pestanya de fluid materials.

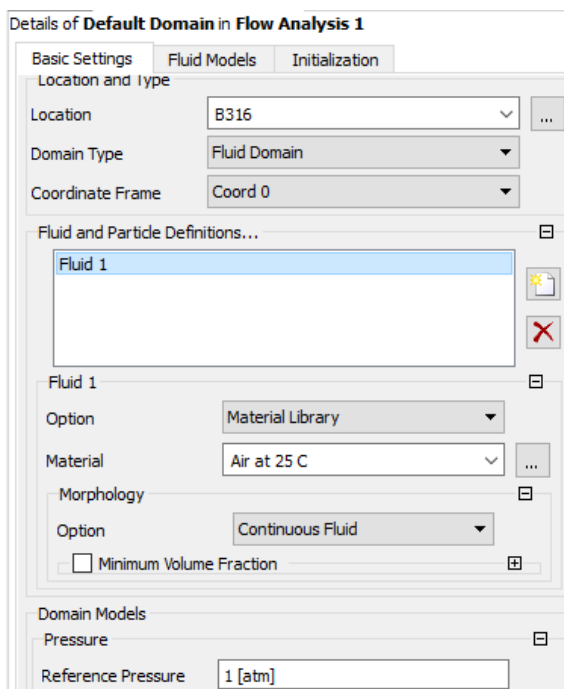


Figura 8.1.3.2.1 Captura de la branca Defaults Domain

Temperature	Density	Specific Heat	Thermal Conductivity	Dynamic Viscosity
K	kg/m ³	J/(kg.K)	W/(m.K)	kg/(m.s)
298	1.186	1005	0.0259	1.840E-5

Figura 8.1.3.2.2: Propietats de l'aire a 25° C [14]

Figura 8.1.3.2.3: Propietats predefinides en el programa

Com es pot observar en la figura 8.1.3.2.3, les propietats són molt similars a les que s'han trobat mitjançant fórmules que relacionen aquestes propietats amb la temperatura (figura 8.1.3.2.2). Com bé destaca la font [10] aquestes fórmules poden tenir un petit error, és possible que els valors que estan definits al programa siguin extrets d'una experimentació prèvia. Degut a la similitud de les diverses propietats, s'ha utilitzat les que ja estaven definides pel programa.

En aquest apartat s'ha de especificar si el flux és transitori o turbulent. En conseqüent s'ha calculat el Reynolds emprant com a longitud, l'altura de l'edifici.

$$Re = \frac{10 \cdot 100 \cdot 1,186}{1,84 \cdot 10^{-5}} = 6,4 \cdot 10^7 > 10^6$$

Així doncs el flux és turbulent. En conseqüent s'ha d'especificar el model de turbulència que es vol utilitzar. La turbulència és difícil de simular i el programa no disposa d'un únic conjunt de equacions que dona una simulació perfecta. Per tant s'ha de triar entre els diferents models amb els seus corresponents conjunts d'equacions.

Entre els diferents models de turbulència es troben : $k-\varepsilon$ i el $k-\omega$ [11]. Com es pot observar a la figura 8.1.3.2.4, el model $k-\omega$ simula millor el comportament del fluid quan es troba a prop de una superfície, en canvi el model $k-\varepsilon$ simula millor el comportament del fluid en regions més allunyades de les superfícies.

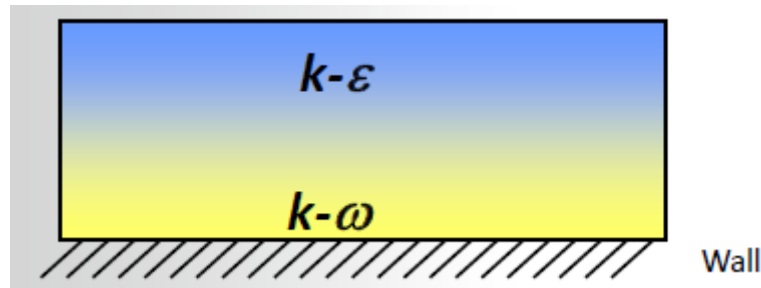


Figura 8.1.3.2.4: Zones en les quals cada model dona millors resultats [11]

Un altre model que ofereix el programa és el Shear Stress Transport model, aquest model utilitza els dos mencionats anteriorment, depenent de la distància a les superfícies. D'aquesta manera es treu el màxim rendiment, utilitzant les diferents equacions on millor s'adapten. No obstant la simulació en conseqüent també serà més complexa i per tant l'esforç a realitzar per part del solver serà més elevat..

Per a decidir quin model utilitzar s'ha decidit comprovar que model SST(glossari) no feia augmentar en excés el temps de simulació. Així doncs, després d'observar que no hi havia cap diferència amb els altres models es va optar per utilitzar-lo en totes les simulacions.

8.1.3.3 Condicions de contorn

Les condicions de contorn s'aplicaran a les diferents superfícies que componen el volum de control i els objectes que estiguin dins d'aquest, en el cas d'estudi doncs, s'haurà d'imposar les respectives condicions a les 6 cares de l'ortoeidre i a la superfície de l'edifici, per a facilitar aquest pas s'ha agrupat les cares que tenen les mateixes condicions de contorn.

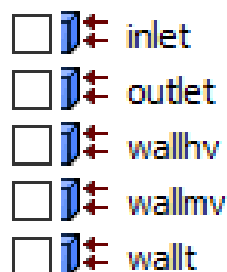


Figura 8.1.3.3.1: Superfícies a les que s'aplica les condicions de contorn

- Inlet: Se li aplica a la superfície a la que se l'ha anomenat Inlet que serà per la qual entrarà el fluid al volum de control. Per a definir aquesta condició de contorn s'ha de definir certs detalls. En el cas d'estudi s'ha imposat que el

flux é subsònic, ja que el nombre de Mach resultant és de 0,029. També s'ha imposat que la velocitat entri normal a la superfície, com s'ha comentat anteriorment a 10 m/s i amb una intensitat de turbulència a l'entrada de 5% [11].

- Outlet: Se li aplica a la superfície a la que s'ha anomenat outlet. Per a definir aquesta condició de contorn s'ha imposat la pressió relativa que tindrà el fluid.
- Wall: Se li aplica a les superfícies restants que formen l'ortoeidre i la que representa l'edifici, no obstant tindran característiques diferents:
 - No slip wall: se li aplica a la superfície que representa el sòl, anomenada wallt, i a la superfície que representa l'hotel, anomenada wallhv. Aquesta condició imposa que no hi ha lliscament, per tant es formaran capes límit.
 - Free slip wall: Se li aplica a les superfícies restants de l'ortoeidre, és a dir les laterals i la superior. Aquesta condició permet lliscar al fluid i per tant només imposa que només hi pugui haver velocitat tangent a la superfície.

8.1.3.4 Solution units.

Per a obtenir els diferents resultats en les unitats desitjades i no tenir la necessitat de fer les conseqüents conversions, es pot modificar les unitats en aquest apartat. En concret les unitats amb les que es treballarà són les que es poden veure en la figura 8.1.3.4.1.

Mass Units	[kg]
Length Units	[m]
Time Units	[s]
Temperature Units	[K]
<input checked="" type="checkbox"/> Angle Units	
Angle Units	[rad]
<input checked="" type="checkbox"/> Solid Angle Units	
Solid Angle Units	[sr]

8.1.3.5 Solver control

En aquest apartat s'imposaran les condicions que controlen el solver. Per una banda s'ha definit l'interval d'iteracions que haurà de realitzar, és a dir el mínim nombre d'iteracions que realitzarà i el màxim que podrà fer. Per al nombre d'iteracions mínim s'ha considerat que amb 5 era suficient. Per al màxim s'ha considerat que 500 eren suficients, ja que es va considerar que si amb aquest nombre de simulacions no convergia potser era un problema derivat dels passos anteriors, i que la solució en aquest cas seria intentar millorar la modelització del problema. No obstant en cap cas s'ha necessitat més de 500 iteracions.

Figura 8.1.3.4.1: Unitats amb les que es visualitzaran els resultats

Per altra banda s'ha de definir el criteri de convergència. Per a iterar, el solver utilitza un conjunt d'equacions, que a partir d'un estat inicial intenta apropar-se cada cop més a la solució final. Per tant si no s'arriba a la solució vol dir que hi ha certs residus en les equacions, es a dir que hi ha un cert error. Per tant s'ha d'especificar un valor a partir del qual es pot considerar que ja ha convergit. El criteri utilitzat és el RMS, i el valor objectiu serà de 0,0001.

8.1.3.6 Output Control, Monitor Points:

Aquest apartat permet monitoritzar durant els transcurso de les iteracions, les variables que utilitza el solver en les diferents equacions. A més també permet assignar expressions que depenen d'aquestes.

Com ja s'ha mencionat anteriorment, en aquest TFG es busca trobar el C_D en funció de l'orientació, per tant és important comprovar que aquest també convergeix. Així doncs s'ha afegit la expressió a partir de la qual es troba aquest coeficient:

$$-force_x()@wallhv*2/(massFlowAve(Density)@inlet*(massFlowAve(Velocity)@inlet)^2*Ap)$$

Tots els valors ja són calculats pel propi programa, l'únic que fa falta introduir en cada simulació manualment és l'àrea projectada, A_p . En aquesta simulació l'àrea projectada és de $1628,77 \text{ m}^2$, també cal comentar que el signe negatiu es degut a que el flux va en sentit contrari a l'eix x.

8.1.4 Solver

Un cop es defineix tot el necessari per la simulació, ja es pot donar pas al solver per a que resolgui el problema.

En les figures 8.1.4.1 i 8.1.4.2 es pot observar l'evolució de el RMS i del C_D al llarg de les iteracions que realitza el solver.

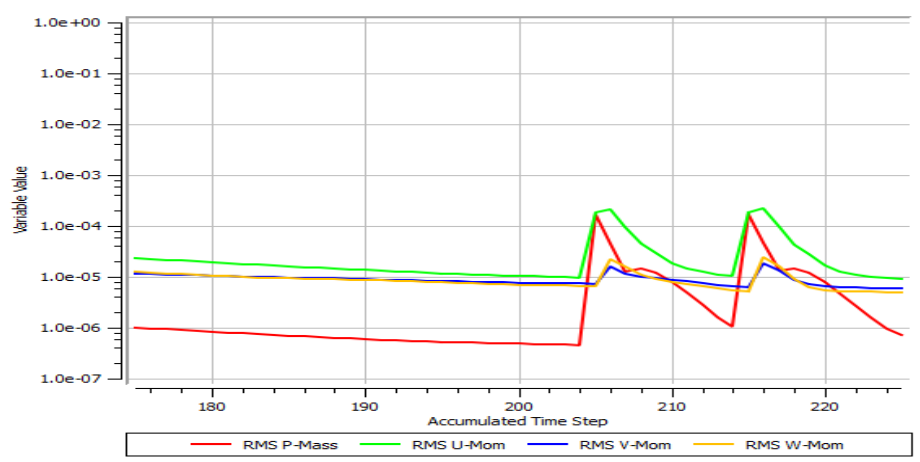


Figura 8.1.4.1: Valors dels RMS al llarg de les iteracions

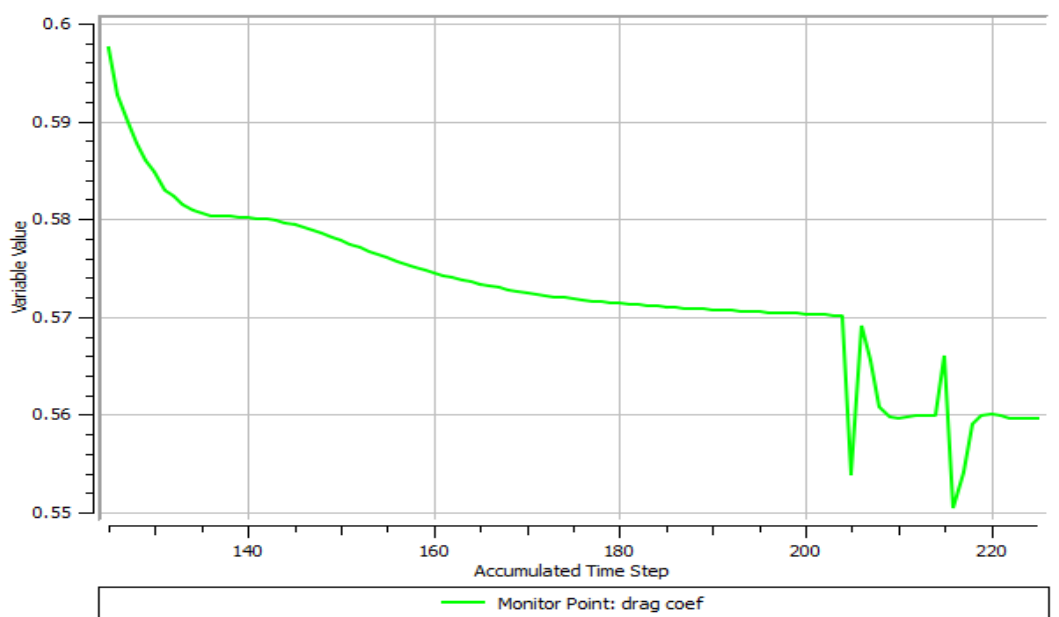


Figura 8.1.4.2: Valor del C_D al llarg de les iteracions

En aquesta simulació es pot observar com el RMS es suficientment petit i per tant es pot considerar que la solució ha convergit.

A més a més també es pot veure com el valor del C_D és de 0,56.

8.1.5 Results

Per a poder visualitzar les dades que puguin ser interessants per a analitzar el problema, és necessari crear elements a partir dels quals el programa mostrarà aquesta informació. Per a entendre millor els diferents resultats que es mostraran, s'explicarà a continuació quins elements s'han utilitzat i com funcionen.

Seguidament s'explicarà quines eines s'han utilitzat per a visualitzar les diferents dades, també s'explicarà perquè s'ha trobat interessant utilitzar aquestes eines en els diferents casos i quines són les observacions que es poden extreure de cada cas.

- *Location*: Amb aquesta eina es pot crear localitzacions a l'espai, per si sola no té cap funció. No obstant és molt útil ja que amb la combinació de les altres eines es podrà visualitzar els resultats més comodament. En concret s'ha utilitzat per a crear plans o polilínies.
- *Contour*: Aquesta eina permet visualitzar la variable seleccionada en la superfície especificada. Aquesta eina mostra el valor de la variable amb regions de diferent color, fent que sigui molt visual.
- *Streamline*: Permet visualitzar variables al llarg de les trajectòries de les partícules, de la mateixa manera que el contour, ells diferents valors venen representats per colors.
- *Chart*: permet visualitzar gràfiques, seleccionant les dos variables que es volen comparar. També s'ha creat localitzacions per a fer aquestes gràfiques.
- *Expression*: permet crear una expressió a partir de les variables que disposa el programa.
- *Variable*: Permet crear variables a partir d'expressions creades previament.

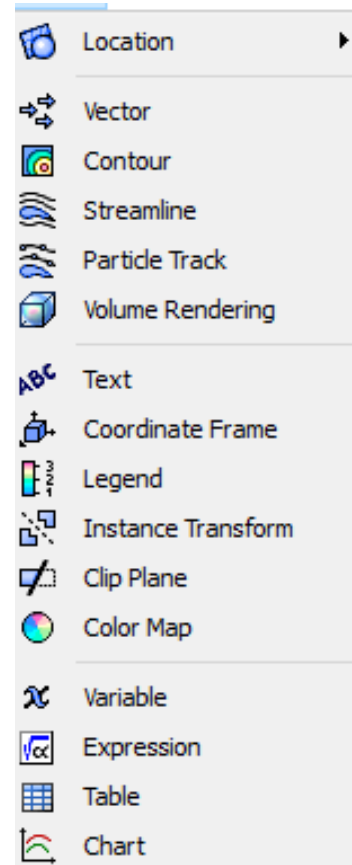


Figura 8.1.5.1: Eines del mòdul Results

8.1.5.1 Velocitats:

Per a l'estudi de velocitats s'ha optat per crear *Streamlines*.

En la figura 8.1.5.1.1 es pot observar com línies que representen les trajectòries de diverses partícules que entren al volum control des de dos altures diferents.

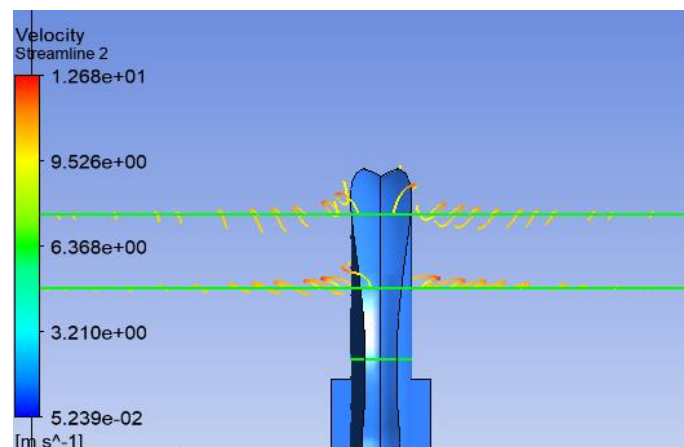


Figura 8.1.5.1.1: Streamlines de la velocitat vista frontal

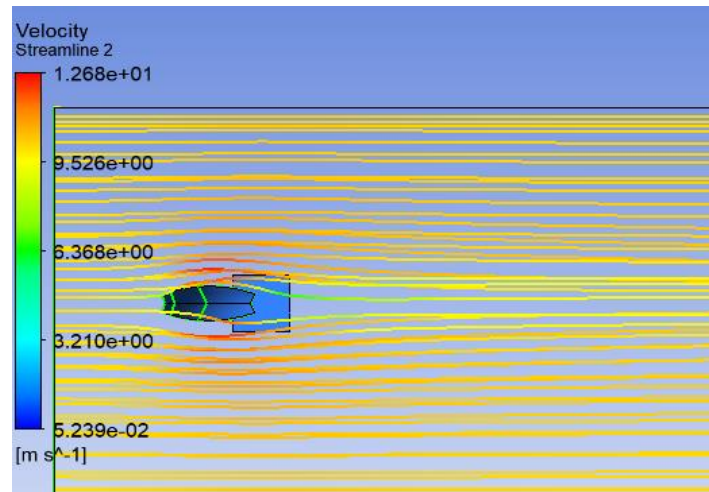


Figura 8.1.5.1.2: Streamlines de la velocitat vista superior

Observant aquestes figures per una banda es pot observar com es veuen afectades les trajectòries de les partícules, per ser més específics, com més a prop de l'edifici més es veuen afectades. Per altra banda es pot observar com justament les partícules que estan més a prop tenen una velocitat superior a la d'entrada. Pel que respecta a les trajectòries més allunyades, es pot observar com la velocitat és pràcticament constant, aquest fet fa pensar que el volum de control ja té unes mides suficients.

Pel que respecta a la velocitat màxima observem que és de 12,68 m/s, que és molt similar a la velocitat màxima d'un cos semi infinit de Rankine, que és de $12,6\sqrt{\infty}$. En el cas d'estudi no es té un cos semi infinit de Rankine, ja que el flux no és bidimensional i la viscositat no és zero. No obstant, en la figura 8.1.5.1.1 es pot observar com les trajectòries són pràcticament paral·leles al pla horitzontal, per tant és coherent que la velocitat sigui similar.

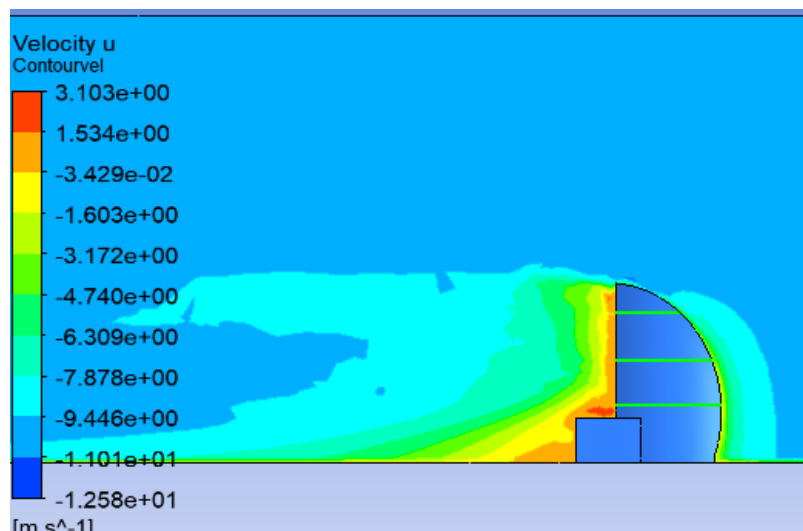


Figura 8.1.5.1.2: Countour de la velocitat en sentit del flux en pla simetria del volum de control

També s'ha realitzat un *contour* en un pla vertical, perpendicular a la velocitat d'entrada i que passa pel centre de l'edifici. En un primer moment es va fer de la velocitat però aquest no donava informació de la direcció, per tant al final s'ha optat per fer en la direcció del flux, obtenint així valors negatius i positius en funció del sentit. En la figura 8.1.5.1.2 es pot observar aquest *contour*, sent el sentit d'entrada oposat a les x, per tant els valors negatius representen el sentit del flux. Així doncs es pot veure com hi ha velocitats contraries al flux (valors positius) en la zona del darrere de l'edifici, degut a la separació de la capa límit en l'edifici.

Amb les últimes tres figures també es pot observar com efectivament el volum de control es suficientment gran, ja que a les superfícies que el delimiten no hi ha una variació apreciable de les velocitat.

8.1.5.2 Pressions:

Pel que respecta a les pressions s'ha realitzat un *contour* a la superfície de l'estructura estudiada. Això permet observar les zones en les quals es presenten pressions elevades, i en les zones on es produeix succió per part del fluid. Com era d'esperar, les pressions més elevades es troben a la zona on impacta el fluid directament i per tant la velocitat es redueix bruscament. En la zona del darrere hi ha una disminució de la pressió molt important i a les zones laterals una disminució encara més accentuada. La disminució de la pressió als laterals es pot explicar pel principi de Bernoulli i el principi de continuïtat de la massa. Per tant el fluid que passa pel lateral com que ha de fer una trajectòria més llarga la velocitat ha d'augmentar, i en conseqüent la pressió ha de disminuir. Com es mostra en la figura 8.1.5.1.2, l'augment de velocitat concorda amb el mencionat.

Aquestes pressions es poden observar en les figures 8.1.5.2.1 i 8.1.5.2.2.

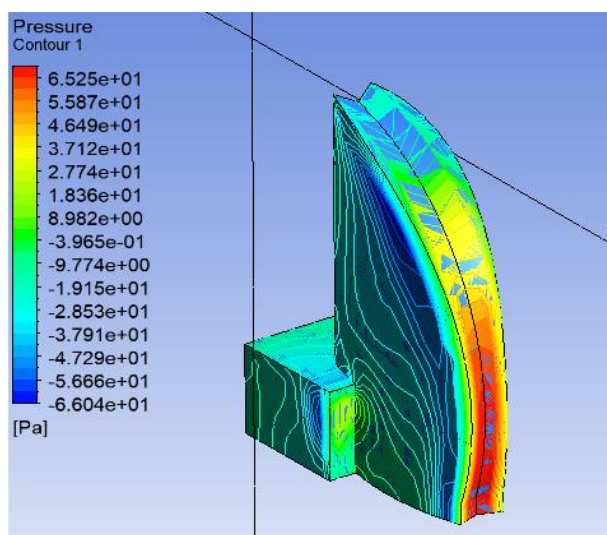


Figura 8.1.5.2.1: Distribució de pressions en la part del davant de l'edifici.

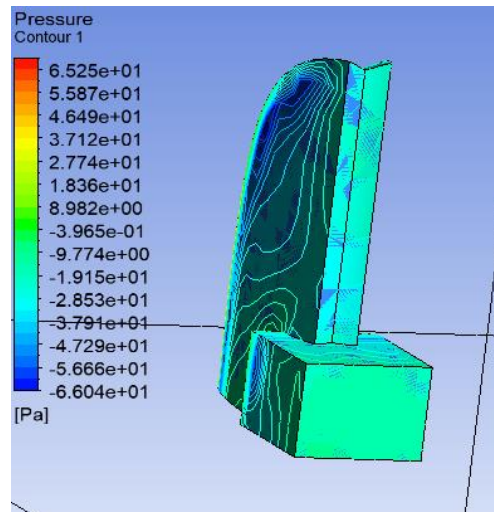


Figura 8.1.5.2.2: Distribució de pressions en la part del darrere de l'edifici.

Uns altres resultats que s'han trobat interessants d'estudiar han estat les distribucions de les pressions en plans horitzontals en diferents altures. Amb aquests gràfics s'ha intentat veure com està distribuïda la pressió a l'edifici en funció de l'altura. Els plans han estat creats a unes altures respecte el terra de: 66, 46 i 26 m. Aquest contorns es veuen representats en les figures 8.1.5.2.3, 8.1.5.2.4 i 8.1.5.2.5.

Amb l'observació del contour del pla a 66 metres es pot extreure que la zona on hi ha la sobrepressió, la pressió relativa arriba fins a 17,81 Pa, no obstant en casi tota tota la superfície les pressions relatives són negatives.

Al pla a 46 metres es dona una situació molt similar però amb uns valors superiors. En concret es pot observar com la pressió màxima és de 53,78 Pa.

Al pla de 26 metres es pot observar una pressió màxima de 63,81 Pa.

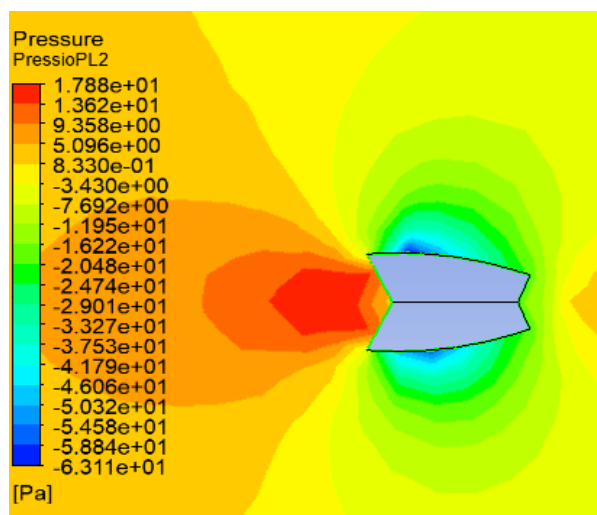


Figura 8.1.5.2.3: Distribució de pressions al pla a 66 metres

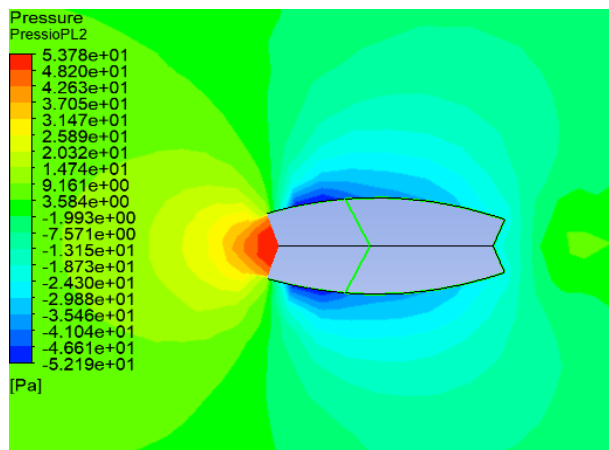


Figura 8.1.5.2.4: Distribució de pressions al pla a 46 metres

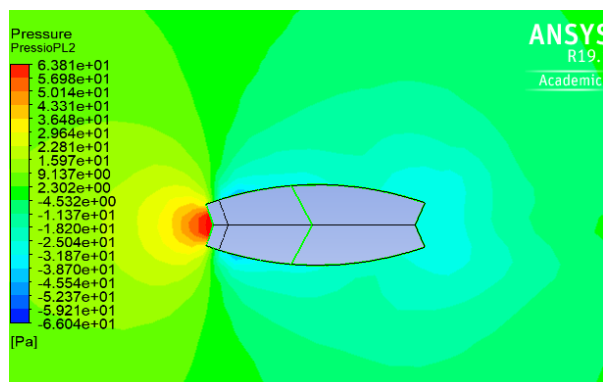


Figura 8.1.5.2.5: Distribució de pressions al pla a 26 metres

8.2 Simulació orientat a 45°:

8.2.1 Geommetry:

El volum de control generat per aquesta simulació és 100 metres més ample ja que s'ha considerat que el realitzat per l'anterior cas era insuficient un cop observat els resultats. Es pot observar aquest canvi en la figura 8.2.1.1

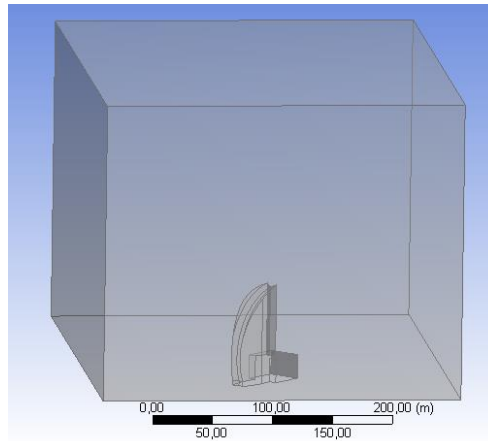


Figura 8.2.1.1: Volum de control del cas a 45°.

8.2.2 Mesh

Per a crear el mallat s'ha utilitzat la mateixa metodologia que en el cas de 0° amb una petita modificació. La mida dels elements superiors ha estat augmentada per a no sobrepassar el límit de nodes que imposa el programa. A la figura 8.2.2.1 s'hi pot apreciar el mallat d'aquesta simulació.

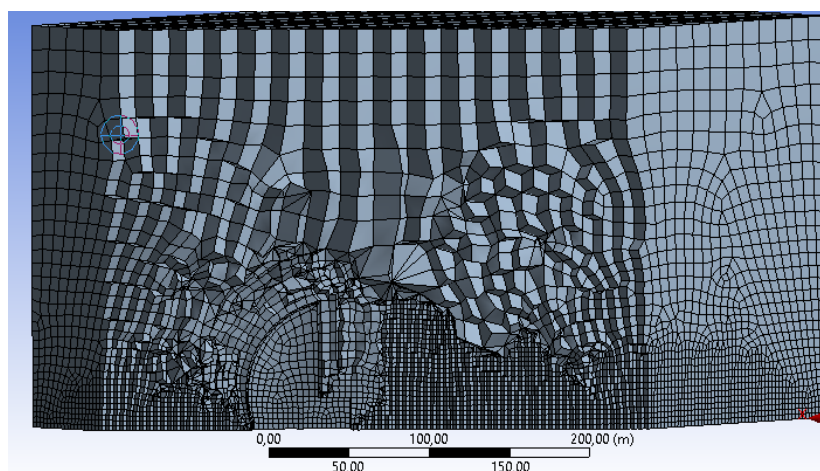


Figura 8.2.2.1: Mallat en el cas orientat a 45°

8.2.3 Setup

En aquest apartat no s'ha hagut de canviar cap dada a excepció de l'expressió del C_D . Tots els altres valors són independents de l'orientació de l'edifici.

8.2.3.1 Output Control, Monitor Points:

Per a calcular el valor del C_D s'ha hagut de modificar l'expressió que es va introduir pel primer cas. Per una banda s'ha modificat l'àrea projectada, sent aquesta de 3226 m². Per altra banda s'ha modificat la part de l'expressió que fa referència a la força. Aquesta modificació és necessària a causa de la manera amb la qual s'ha creat la geometria. Per a modificar l'orientació de l'edifici es va optar per modificar el volum de control, deixant l'edifici sempre en la mateixa orientació, per tant com que està a 45º s'ha fet la projecció i se li ha canviat el signe quan la projecció anava en sentit oposat al flux.

```
(0.707*force_z())@wallhv-
0.707*force_x()@wallhv)*2/(massFlowAve(Density)@inlet*(massFlowAve(Velocity)@i
nlet) ^ 2*3226.32)
```

8.2.4 Solver

El valor del c_D en aquesta orientació és de 1,129 tal i com es pot observar a la figura 8.2.4.1

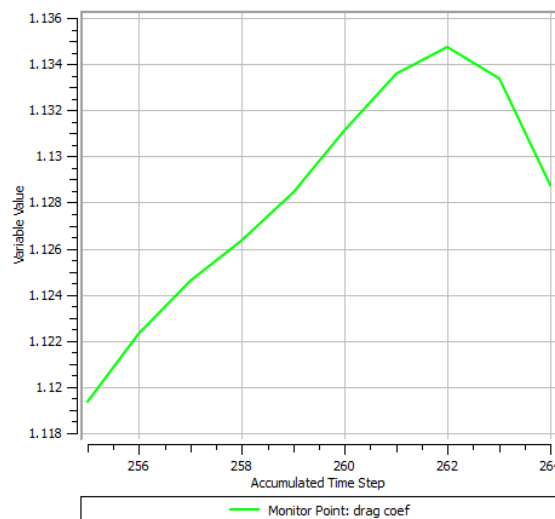


Figura 8.2.4.1: Valor del C_D al llarg de les iteracions

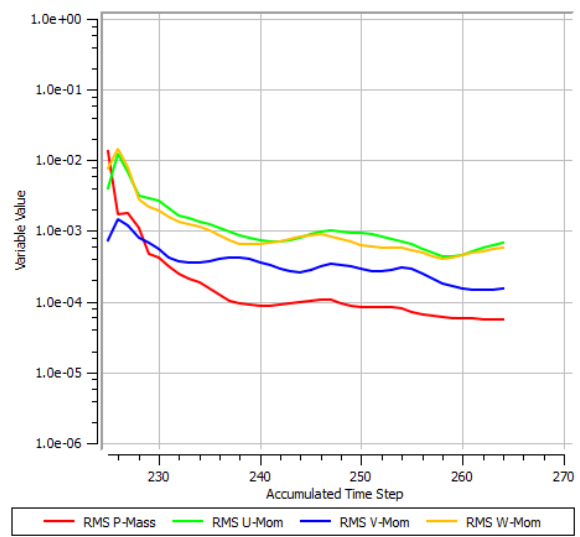


Figura 8.2.4.2: Valors dels RMS al llarg de les iteracions

Com es pot veure en la figura 8.2.4.2, el RMS de les diferents equacions que utilitza el programa, es suficientment petit com per a poder suposar que la solució ha convergit.

8.2.5 Results

Els resultats que es mostren en aquest apartat són els equivalents a la simulació anterior, ja que es podrà mirar quines similituds o diferències hi ha entre els diferents casos.

8.2.5.1 Velocitats:

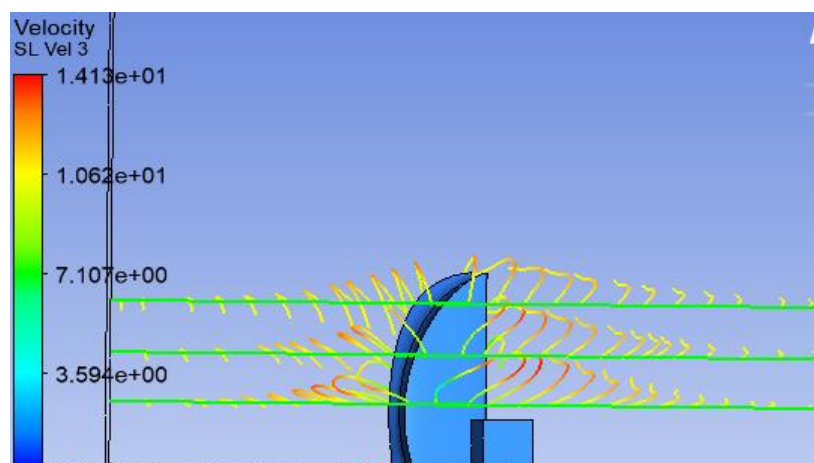


Figura 8.2.5.1.1: Streamlines de la velocitat vista frontal

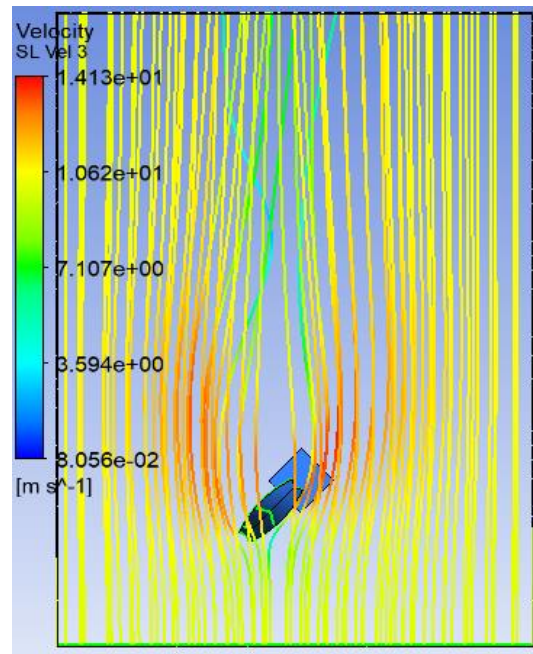


Figura 8.2.5.1.2: Streamlines de la velocitat vista superior

Com es pot observar a les figures 8.2.5.1.2 i 8.2.5.1.2, com en el cas anterior, hi ha un augment de la velocitat del fluid en la zona més propera a l'edifici. Com ja s'ha comentat aquest fet és degut a la conservació de la massa. No obstant s'hi poden apreciar diferències amb el cas anterior. En primer lloc observem com les trajectòries estan molt més distorsionades degut a que l'àrea projectada en el pla perpendicular al flux és superior, per tant el recorregut que han de fer és major. En segon lloc es pot observar també com la velocitat màxima és més gran que en el cas a 0° , ja que les trajectòries també es veuen afectades en la direcció vertical. Així doncs en aquest cas, el flux no s'apropa al flux bidimensional que s'ha comentat abans, i en conseqüent la velocitat màxima no s'assembla a la del cos semi infinit de Rankine.

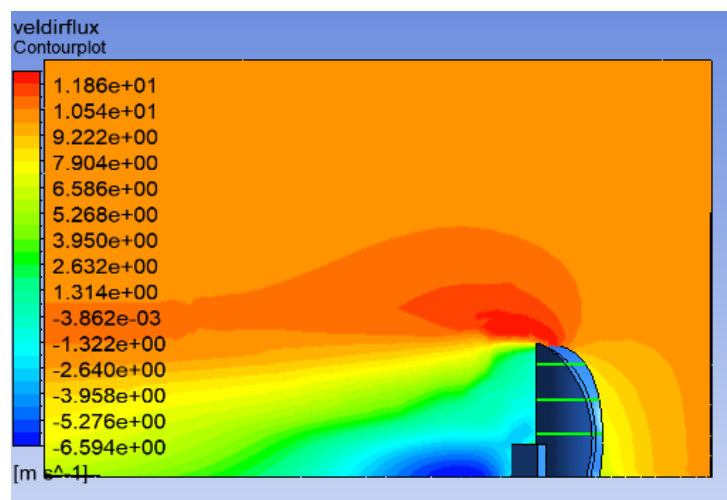


Figura 8.2.5.1.3: Countour de la velocitat en sentit del flux en pla simetria del volum de control

A la figura 8.2.5.1.3 es pot observar la velocitat en la direcció del flux. Com ja s'ha comentat anteriorment, la direcció del flux no concorda amb cap dels eixos globals, per tant a visualitzar aquests resultats s'ha creat una variable a partir de les projeccions dels eixos globals.

$$\text{Veldirflux} = (\text{Velocity } w) * 0.707 - (\text{Velocity } u) * 0.707$$

8.2.5.2 Pressions:

La figura 8.2.5.2.1 mostra la pressió en la zona per on impacta el fluid, per tant hi ha les pressions màximes degudes al canvi de velocitat del fluid. Cal destacar que la zona de pressions elevades és molt més gran que en el cas de 0° , fet lògic si es té present que l'àrea d'impacte del fluid és molt més elevada. No obstant, la pressió és molt elevada en dos regions relativament petites, representades pel color vermell, i una pressió més moderada, representada pel color groc i taronja en la resta de la zona frontal.

Conseqüentment les zones laterals i sobretot la del darrere, la pressió relativa és negativa (veure figura 8.2.5.2.2).

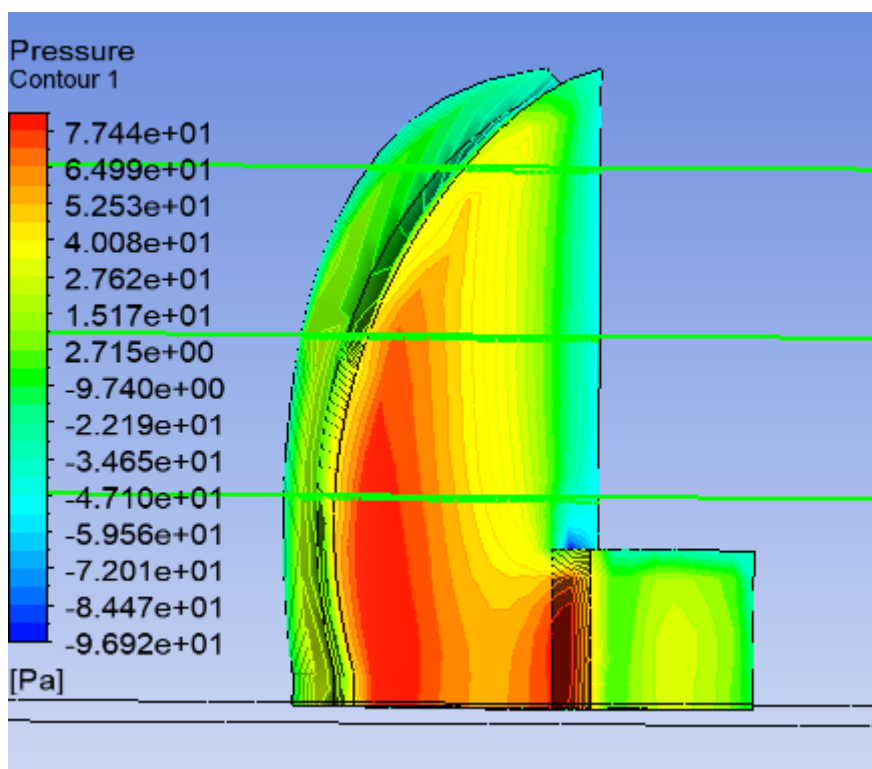


Figura 8.2.5.2.1: Distribució de pressions en la part del davant de l'edifici.

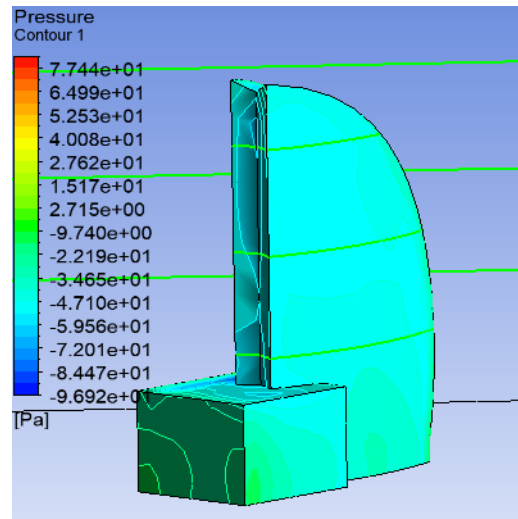


Figura 8.2.5.2.2: Distribució de pressions en la part del darrere de l'edifici.

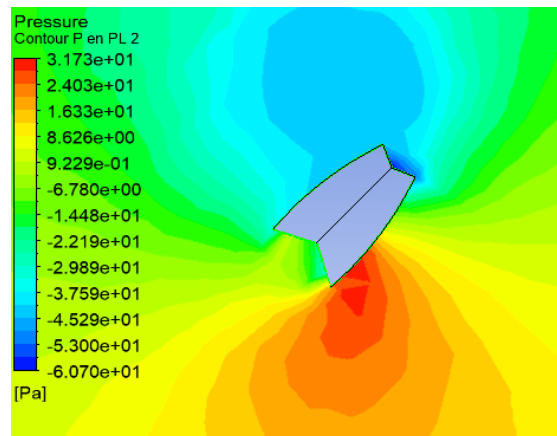


Figura 8.2.5.2.3: Distribució de pressions al pla a 66 metres

Amb l'observació del *contour* del pla a 66 metres es pot extreure que la zona on hi ha la sobrepressió, la pressió relativa arriba fins a 31,7 Pa, no obstant en casi tota aquesta regió, la pressió entre 16 i 0 Pa.

Al pla a 46 metres es dóna una situació molt similar però amb uns valors diferents. En concret es pot observar com la pressió màxima és de 72,87 Pa, però amb la gran part d'aquesta zona es troba entre 51,53 i 0 Pa.

Al pla de 26 metres es pot observar una pressió màxima de 80 Pa i l'interval en el que es troba la majoria de pressions és de 62,5 a 0 Pa.

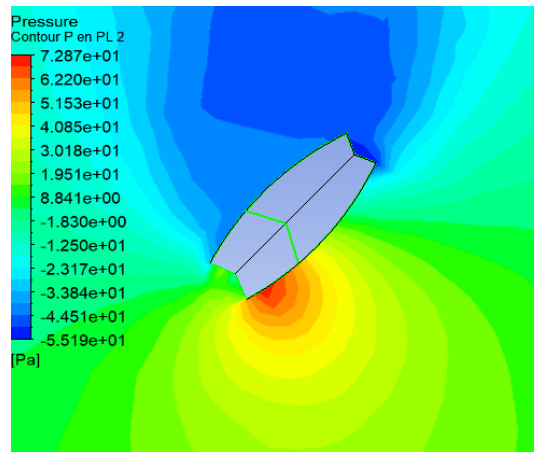


Figura 8.2.5.2.4: Distribució de pressions al pla a 46 metres

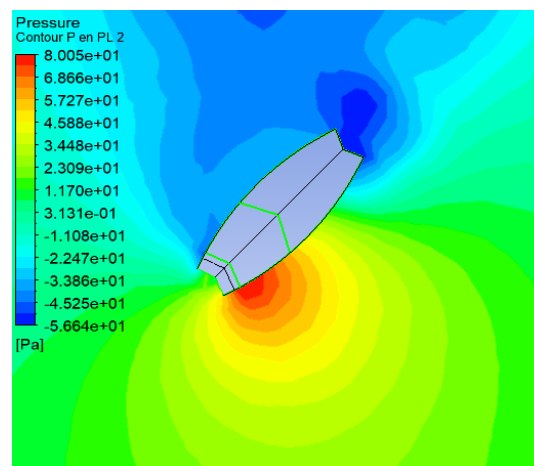


Figura 8.2.5.2.5: Distribució de pressions al pla a 26 metres

8.3 Simulació orientat a 90°:

8.3.1 Geommetry:

En aquesta simulació s'ha tornat a augmentar el volum en 100 metres ja que cap dels dos volums anteriors era suficient. En les zones més properes a les parets laterals hi havia certes variacions en les pressions i velocitats i per tant es va trobar necessari generar-ne un de més gran. Aquest canvi es pot observar en la figura 8.3.1.1.

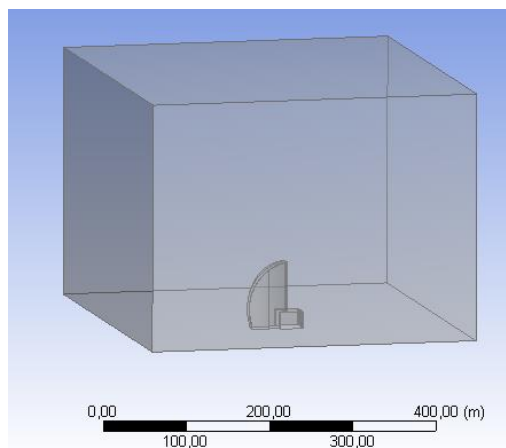


Figura 8.3.1.1: Volum de control del cas a 90°.

8.3.2 Mesh

Per a crear el mallat s'ha utilitzat la mateixa metodologia que en el casos anteriors amb una petita modificació. Com en la simulació de 45°, la mida dels elements superiors ha estat augmentada per a no sobrepassar el límit de nodes que imposa el programa. A la figura 8.3.2.1 s'hi pot apreciar el mallat d'aquesta simulació.

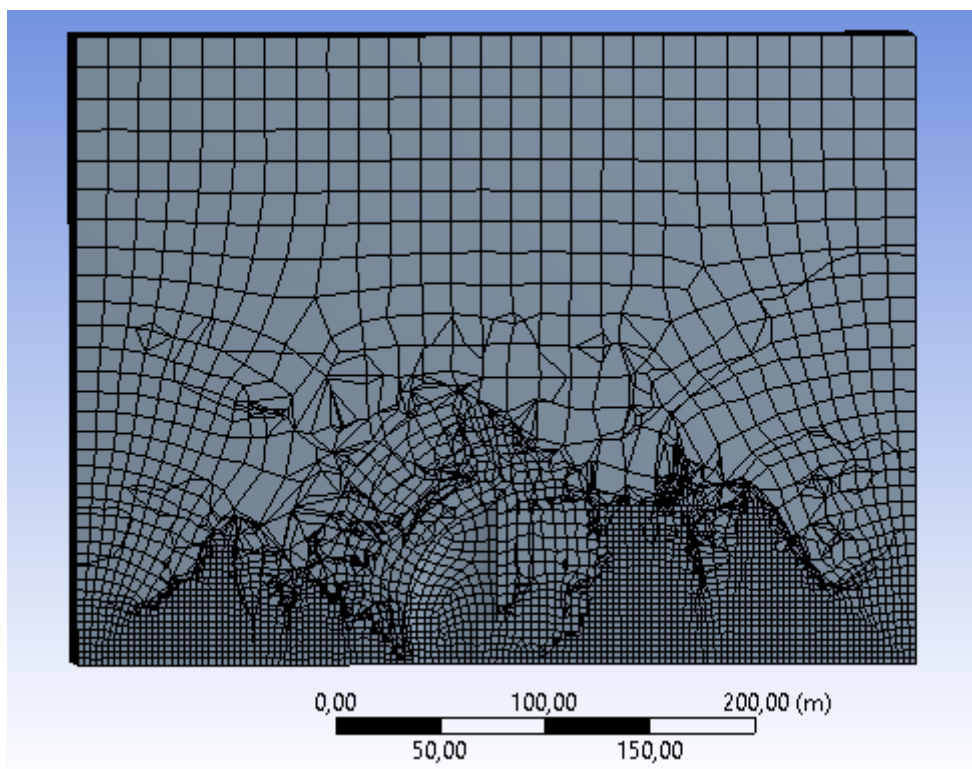


Figura 8.3.2.1: Mallat en el cas orientat a 90°

8.3.3 Setup

8.3.3.1 Output Control, Monitor Points:

En aquesta simulació s'ha hagut de procedir de la mateixa manera que en la de 45° ja que tant els eixos de la base global com el valor de l'àrea projectada es veien modificats.

En aquesta simulació l'àrea projectada és de 3503,32 m² i la direcció del flux coincideix amb l'eix z. Per tant la expressió introduïda ha estat la següent:

$$(\text{force_z})@wallhv)^2/(\text{massFlowAve}(\text{Density})@inlet*(\text{massFlowAve}(\text{Velocity})@inlet)^2*3503.32)$$

8.3.4 Solver

El valor del C_D en aquesta orientació és de 1,24 tal i com es pot observar a la figura 8.3.4.1.

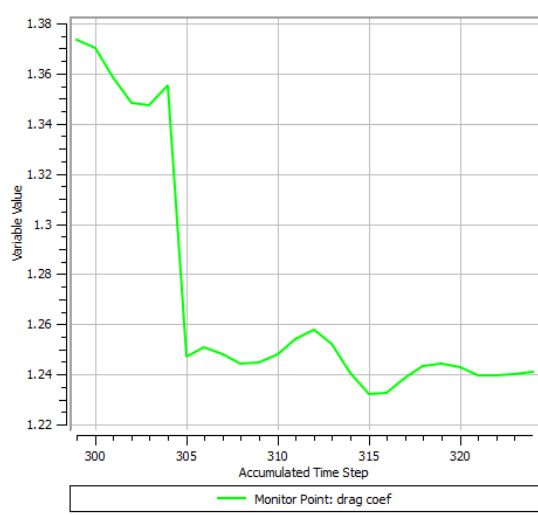


Figura 8.3.4.1: Valor del C_D al llarg de les iteracions

Com es pot veure en la figura 8.3.4.2, el RMS de les diferents equacions que utilitza el programa, es suficientment petit com per a poder suposar que la solució ha convergit.

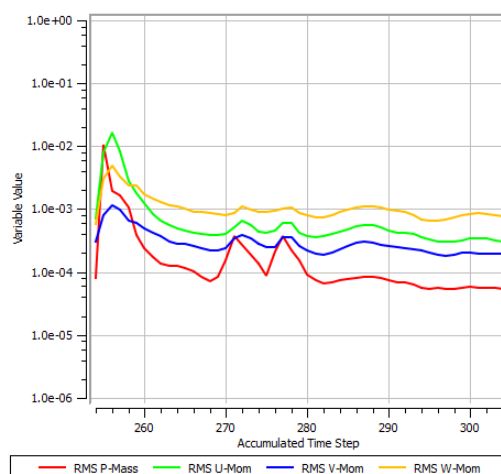


Figura 8.3.4.2: Valors dels RMS al llarg de les iteracions

8.3.5 Results

8.3.5.1 Velocitats:

Com es pot observar a les figures 8.3.5.1.1 i 8.3.5.1.2 com en les simulacions anteriors, hi ha un augment de la velocitat del fluid en la zona més propera a l'edifici. Com ja s'ha comentat aquest fet és degut a la conservació de la massa. No obstant s'hi poden apreciar diferències. El resultat són molt més semblants al cas de 45° que al de 0° , però amb una variació de la trajectòria més accentuada en aquesta simulació.

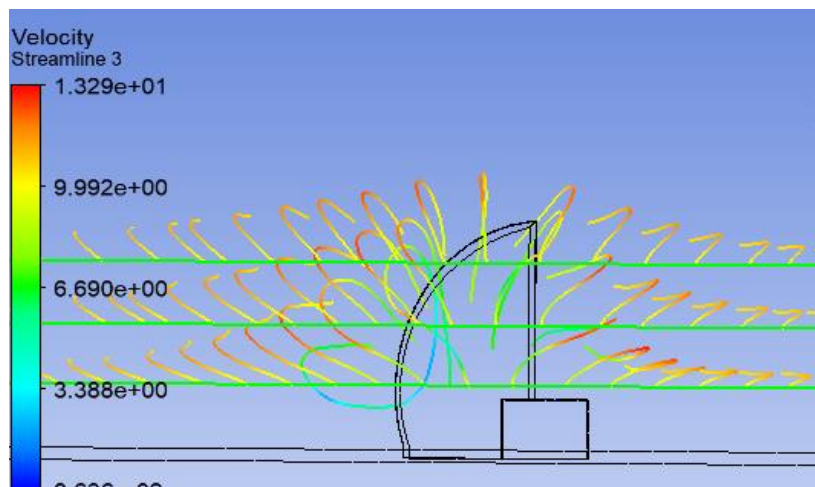


Figura 8.3.5.1.1: Streamlines de la velocitat vista frontal

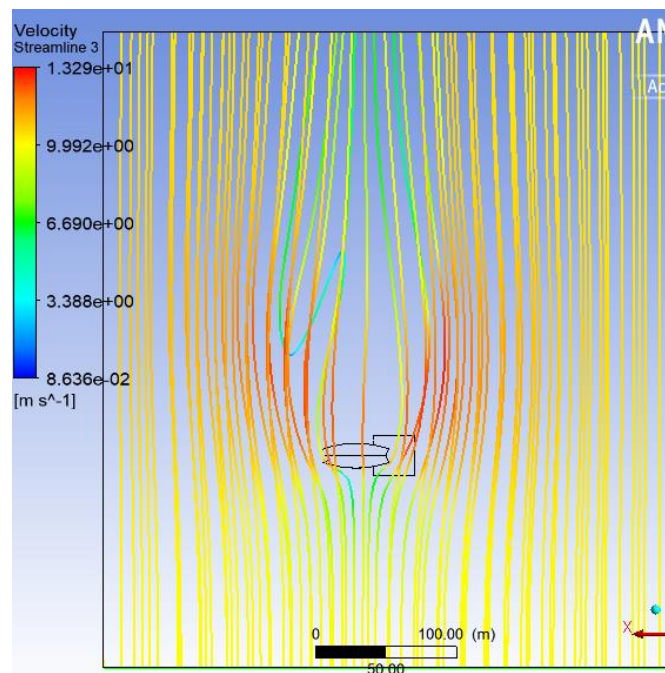


Figura 8.3.5.1.2: Streamlines de la velocitat vista superior

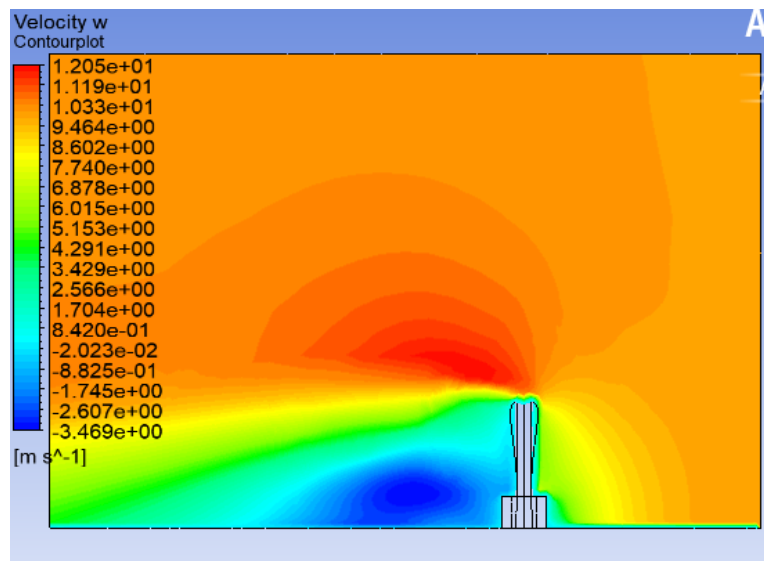


Figura 8.3.5.1.3: Countour de la velocitat en sentit del flux en pla simetria del volum de control

A la figura 8.3.5.1.3 es pot observar la velocitat en la direcció del flux. En aquesta simulació la direcció del flux coincideix amb l'eix z, per tant no ha estat necessari crear cap variable. Com es pot observar, la velocitat en la zona propera a la cara superior és molt propera a 10, en la zona posterior de l'edifici es poden observar velocitats negatives, degut a la separació de la capa límit.

8.3.5.2 Pressions:

La figura 8.3.5.2.1 mostra la pressió en la zona per on impacta el fluid, per tant s'hi troben les pressions màximes degudes al canvi de velocitat del fluid. Cal destacar que la zona de pressions elevades és més gran que en el cas de 45° i en conseqüent del de 0°. Com ja s'ha comentat, és lògic aquest resultat si es té present que l'àrea d'impacte del fluid és més elevada.

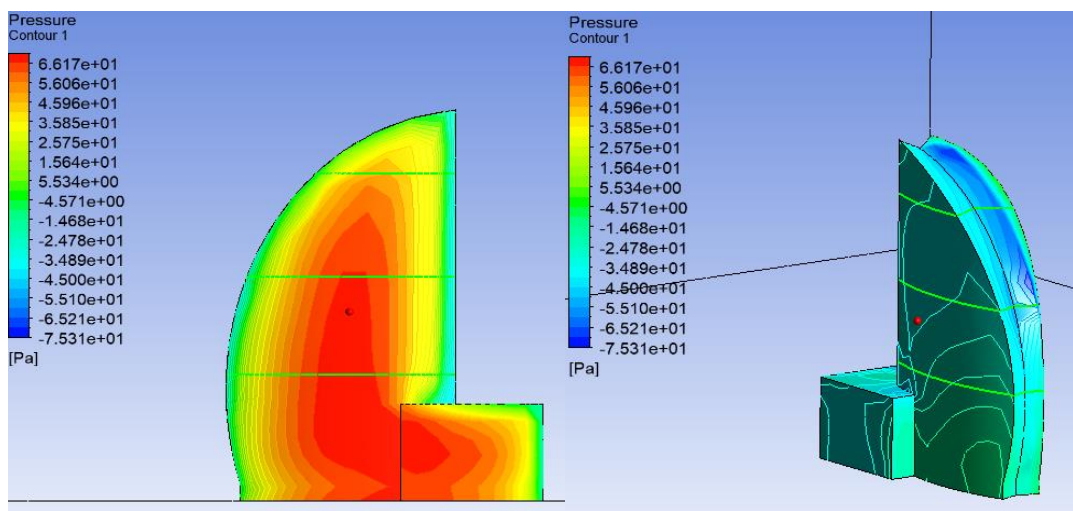


Figura 8.3.5.2.1: Distribució de pressions en la part del davant i del darrere de l'edifici.

Amb l'observació del *contour* del pla a 66 metres es pot extreure que la zona on hi ha la sobrepressió, la pressió relativa arriba fins a 56,76 Pa, a més a més en casi tota aquesta regió, la pressió es troba per sobre dels 20 Pa.

Al pla a 46 metres es dóna una situació molt similar però amb uns valors diferents. En concret es pot observar com la pressió màxima és de 66,49 Pa, i amb la majoria d'aquesta zona per sobre de 25,25 Pa.

Al pla de 26 metres es pot observar una pressió màxima de 69,85 Pa i l'interval en el que es troba la majoria de pressions es troba limitat inferiorment per 30,74 Pa.

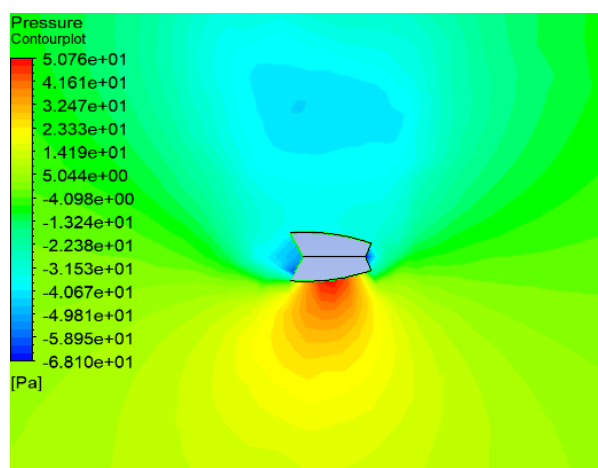


Figura 8.3.5.2.3: Distribució de pressions al pla a 66 metres

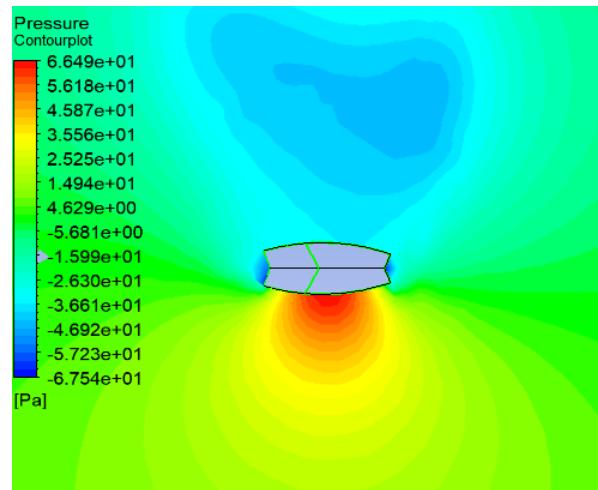


Figura 8.3.5.2.4: Distribució de pressions al pla a 46 metres

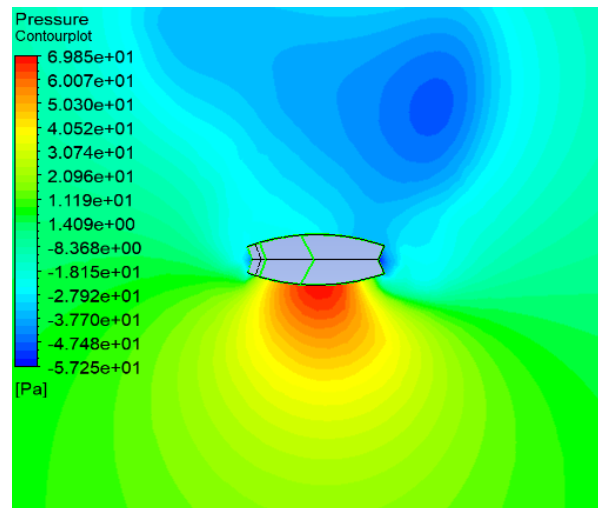


Figura 8.3.5.2.5: Distribució de pressions al pla a 26 metres

8.4 Simulació orientat a oestº:

8.4.1 Geometry:

En aquesta simulació s'ha generat el mateix volum de control que en la simulació de 45º. Per tant com es pot observar a la figura 8.4.1.1, l'amplada és 100 metres superior al cas inicial.

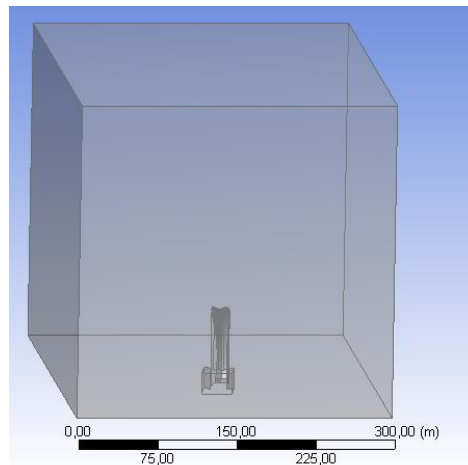


Figura 8.4.1.1: Volum de control del cas orientació Oest.

8.4.2 Mesh

Per a crear el mallat s'ha utilitzat la mateixa metodologia que en el casos anteriors amb una petita modificació. En aquesta simulació s'ha utilitzat les mateixes mides de malla que en la simulació de 45º a la figura 8.4.2.1 s'hi pot apreciar el mallat d'aquesta simulació.

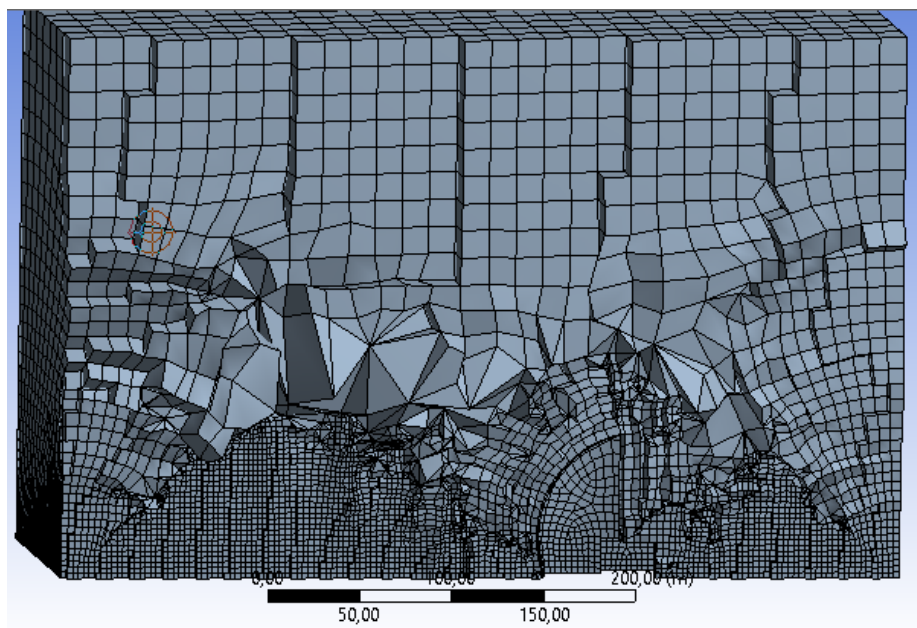


Figura 8.4.2.1: Mallat en el cas orientat a l'oest

8.4.3 Setup

8.4.3.1 Output Control, Monitor Points:

En aquesta simulació s'ha hagut de procedir de la mateixa manera que en la de 45º ja que tant els eixos de la base global com el valor de l'àrea projectada es veien modificats.

En aquesta simulació l'àrea projectada és de 1786,54 m². Per a triar les projeccions dels eixos globals per a trobar la direcció del flux es pot observar des de la vista superior. D'aquesta manera es pot veure ràpidament quin eix s'ha d'aplicar el cosinus o el sinus de 10°. També permet veure si el valor de la projecció ha de ser positiu o negatiu per quadrar el sentit. En aquest cas l'expressió queda de la següent manera:

```
(0.98*force_x())@wallhv-
0.17*force_z())@wallhv)*2/(massFlowAve(Density)@inlet*(massFlowAve(Velocity)@inlet)^2*1786.54)
```

8.4.4 Solver

El valor del c_D en aquesta orientació és de 0,717 tal i com es pot observar a la figura 8.4.4.1

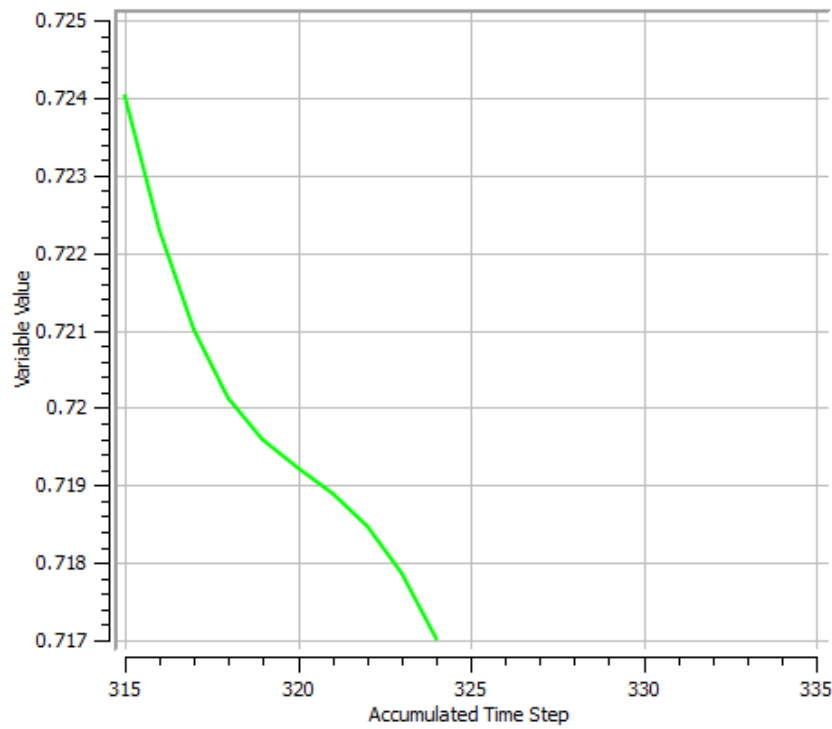


Figura 8.4.4.1: Valor del C_D al llarg de les iteracions

Com es pot veure en la figura 8.4.4.2, el RMS de les diferents equacions que utilitza el programa, es suficientment petit com per a poder suposar que la solució ha convergit.

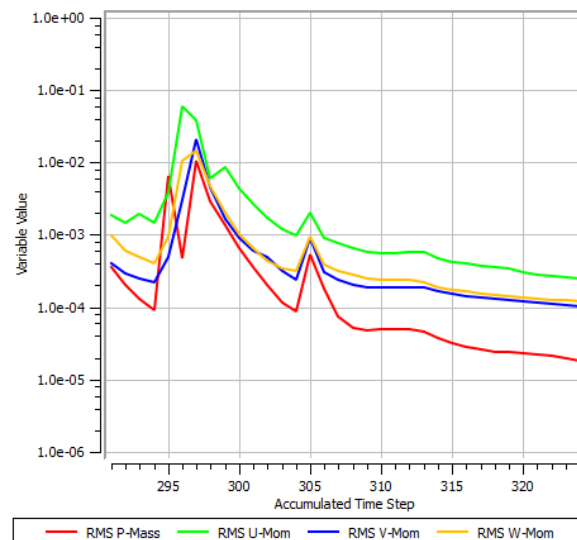


Figura 8.4.4.2: Valors dels RMS al llarg de les iteracions

8.4.5 Results

8.4.5.1 Velocitats:

Com es pot observar a les figures 8.4.5.1.1 i 8.4.5.1.2 com en el les simulacions anteriors, hi ha un augment de la velocitat del fluid en la zona més propera a l'edifici. Com ja s'ha comentat aquest fet és degut a la conservació de la massa. No obstant s'hi poden apreciar diferències. Aquesta simulació és més semblant a la de 0° que les de 45° i 90° . Les trajectòries de les partícules del fluid no es veuen tan afectades, i en conseqüent la variació de la velocitat no és tan elevada.

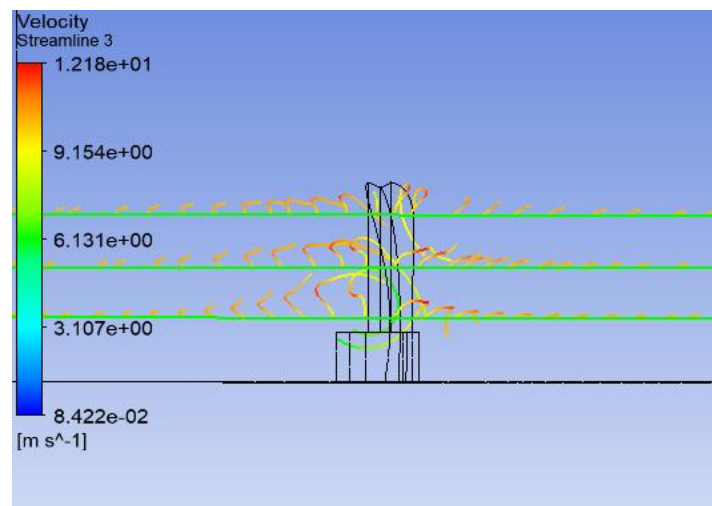


Figura 8.4.5.1.1: Streamlines de la velocitat vista frontal

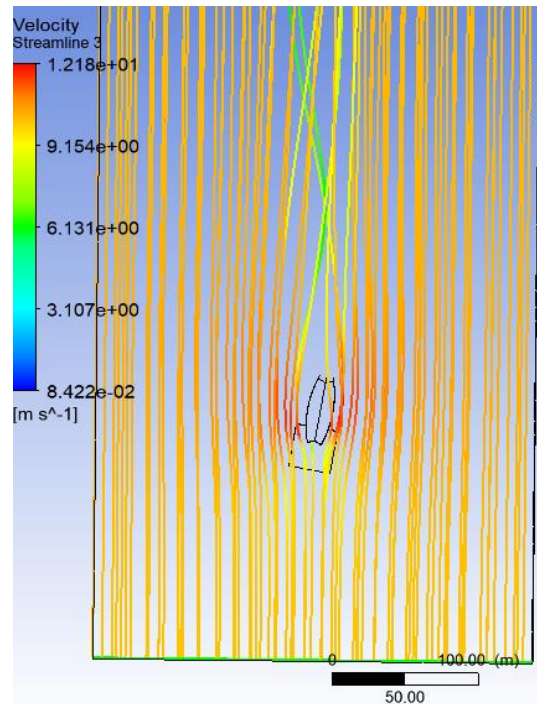


Figura 8.4.5.1.2: Streamlines de la velocitat vista superior

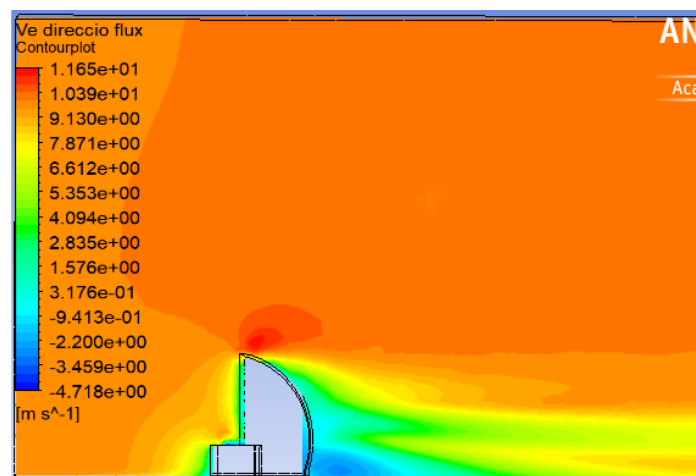


Figura 8.4.5.1.3: Countour de la velocitat en sentit del flux en pla simetria del volum de control

A la figura 8.4.5.1.3 es pot observar la velocitat en la direcció del flux. En aquesta simulació la direcció del flux no coincideix amb cap eix global, per tant s'ha necessitat crear una variable. Per a crear aquesta variable s'ha projectat les velocitats del fluids en els eixos globals en la direcció del flux. Com es pot observar, la velocitat en la zona propera a la cara superior és molt propera a 10, en la zona posterior de l'edifici es poden observar velocitats negatives, degut a la separació de la capa límit.

8.4.5.2 Pressions:

La figura 8.4.5.2.1 mostra la pressió en la zona per on impacta el fluid, per tant s'hi troben les pressions màximes degudes al canvi de velocitat del fluid. Cal destacar que la zona de pressions elevades és molt més petita que en les simulacions de 45 i 90° com era d'esperar, ja que la superfície projectada és molt petita.

Conseqüentment les zones laterals i la del darrere, la pressió relativa és negativa, tal i com es pot observar en la figura 8.4.5.2.2.

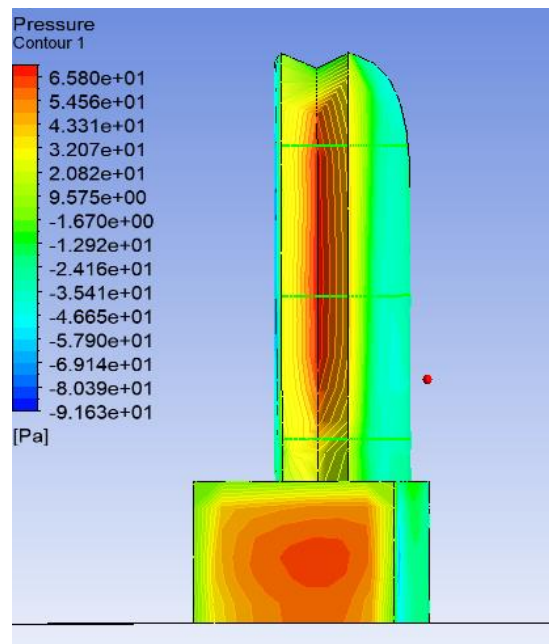


Figura 8.4.5.2.1: Distribució de pressions en la part del davant de l'edifici.

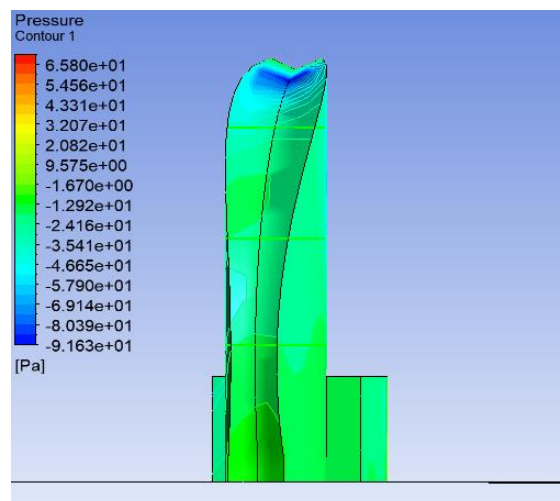


Figura 8.4.5.2.2: Distribució de pressions en la part del darrere de l'edifici.

Pel que respecta a les pressions en funció de l'altura s'ha observat com aquest vas diferia dels altres ja que les pressions màximes es trobaven a la part superior. Com es pot observar tant en el pla a 66 com el pla a 46 metres, les pressions màximes són més elevades que en el pla a 26. Sent de l'única en la que es dóna aquest fet.

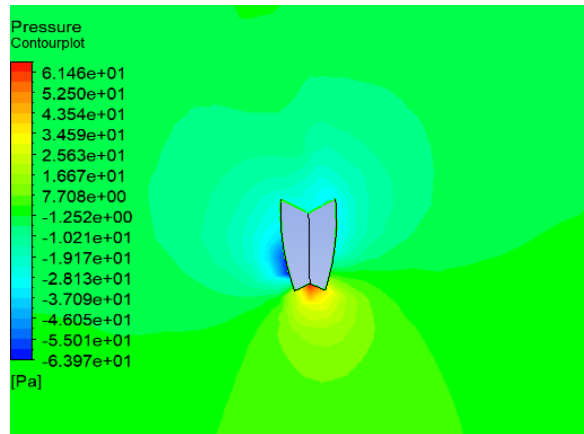


Figura 8.4.5.2.3: Distribució de pressions al pla a 66 metres

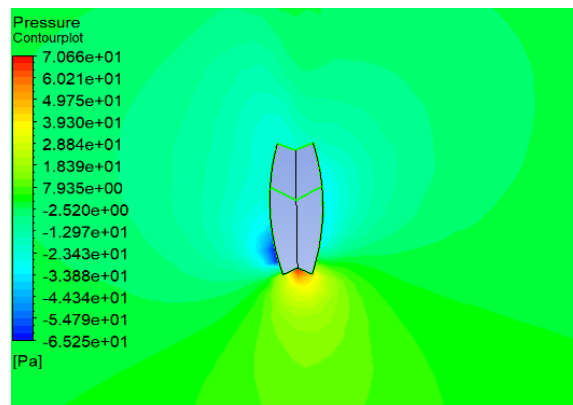


Figura 8.4.5.2.4: Distribució de pressions al pla a 46 metres

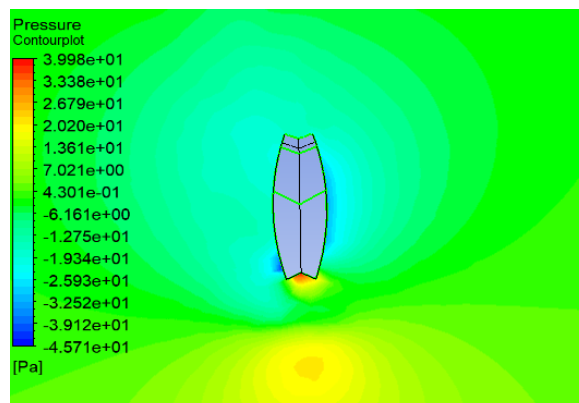


Figura 8.4.5.2.5: Distribució de pressions al pla a 26 metres

8.5 Simulació orientat a sud:

8.5.1 Geommetry:

En aquesta simulació s'ha tornat a generar un volum de control com el del cas de 90° ja que cap dels altres volums era suficient. En les zones més properes a les parets laterals hi havia certes variacions en les pressions i velocitats i per tant es va trobar necessari generar-ne un de més gran. Aquest canvi es pot observar en la figura 8.5.1.1.

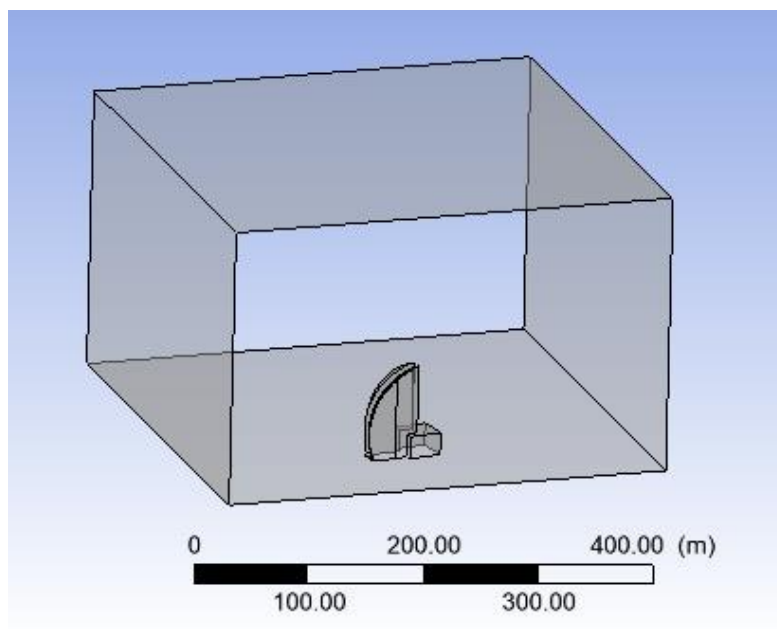


Figura 8.5.1.1: Volum de control del cas orientat al Sud.

8.5.2 Mesh

Per a crear el mallat s'ha utilitzat la mateixa metodologia que en el casos anteriors amb una petita modificació. Com en les simulacions anteriors, la mida dels elements superiors ha estat augmentada per a no sobrepassar el límit de nodes que imposa el programa. A la figura 8.5.2.1 s'hi pot apreciar el mallat d'aquesta simulació.

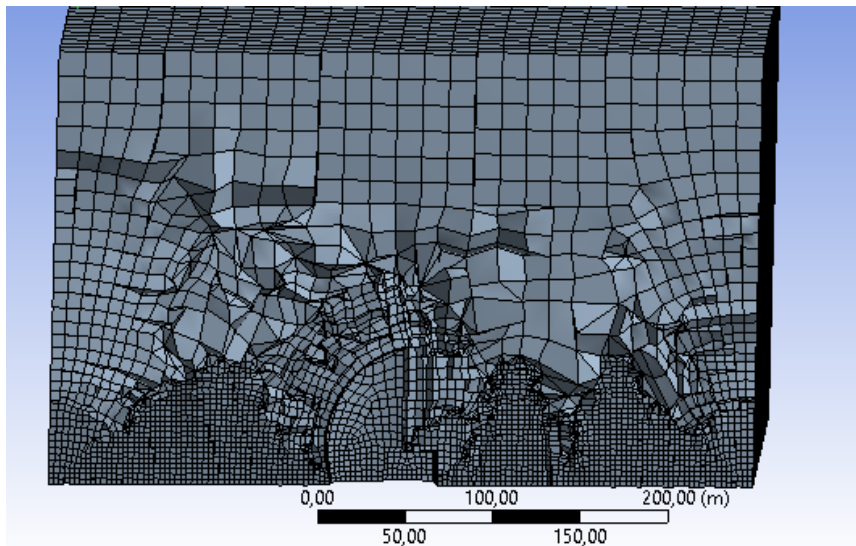


Figura 8.5.2.1: Mallat en el cas orientat al sud

8.5.3 Setup

8.5.3.1 Output Control, Monitor Points:

En aquesta simulació s'ha hagut de procedir de la mateixa manera que en la de 45º ja que tant els eixos de la base global com el valor de l'àrea projectada es veien modificats.

En aquesta simulació l'àrea projectada és de 3634,07 m². Per a triar les projeccions dels eixos globals per a trobar la direcció del flux es pot observar des de la vista superior. D'aquesta manera es pot veure ràpidament quin eix s'ha d'aplicar el cosinus o el sinus de 10º. També permet veure si el valor de la projecció ha de ser positiu o negatiu per quadrar el sentit. En aquest cas l'expressió queda de la següent manera:

```
(0.98*force_z())@wallhv-
0.17*force_x()@wallhv)*2/(massFlowAve(Density)@inlet*(massFlowAve(Velocity)@inlet) ^ 2*3634.07)
```

8.5.4 Solver

El valor del c_D en aquesta orientació és de 1,36 tal i com es pot observar a la figura 8.5.4.1.

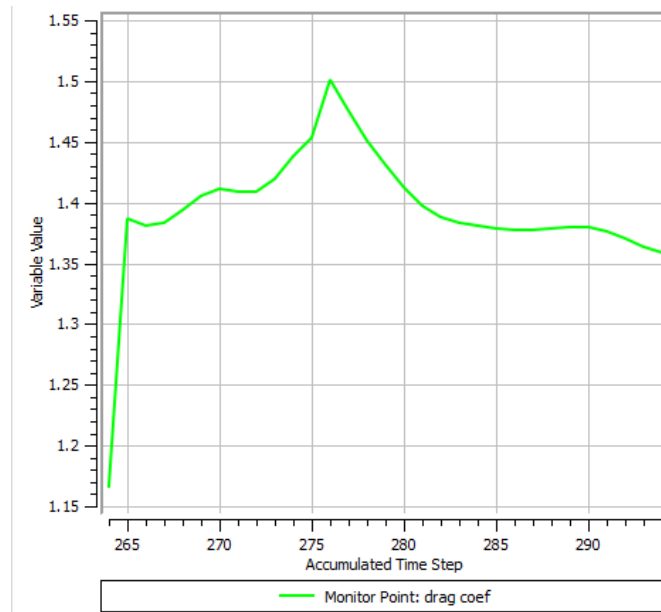


Figura 8.5.4.1: Valor del C_D al llarg de les iteracions

Com es pot veure en la figura 8.5.4.2, el RMS de les diferents equacions que utilitza el programa, es suficientment petit com per a poder suposar que la solució ha convergit.

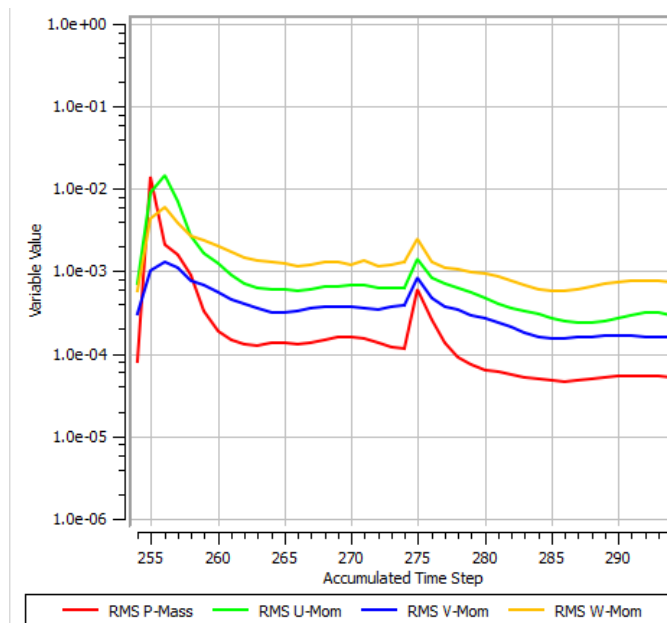


Figura 8.5.4.2: Valor dels RMS al llarg de les iteracions

8.5.5 Results

8.5.5.1 Velocitats:

Com es pot observar a les figures 8.5.5.1.1 i 8.5.5.1.2, com en el les simulacions anteriors, hi ha un augment de la velocitat del fluid en la zona més propera a l'edifici. Com ja s'ha comentat aquest fet és degut a la conservació de la massa. No obstant s'hi poden apreciar diferències. Aquesta simulació és més semblant a les de 90° i 45° que a la de 0° . Les trajectòries de les partícules del fluid es veuen molt més afectades, i en conseqüent la variació de la velocitat és molt elevada.

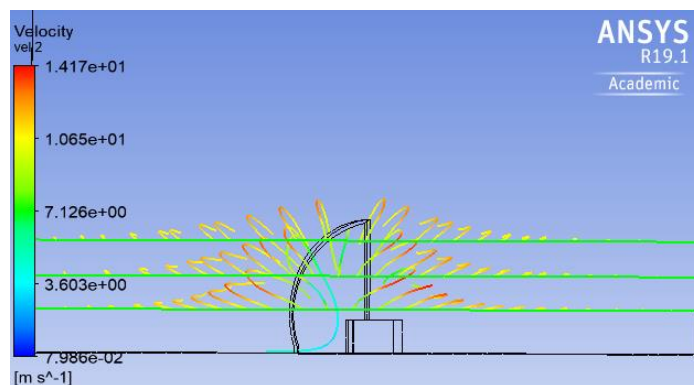


Figura 8.5.5.1.1: Streamlines de la velocitat vista frontal

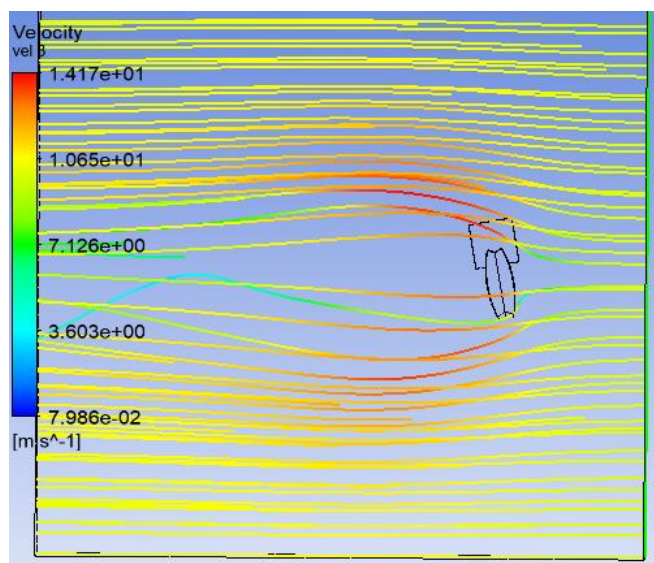


Figura 8.5.5.1.2: Streamlines de la velocitat vista superior

A la figura 8.5.5.1.3 es pot observar la velocitat en la direcció del flux. En aquesta simulació la direcció del flux no coincideix amb cap eix global, per tant també s'ha necessitat crear una variable. Com ja s'ha comentat, s'ha projectat les velocitats del fluids en els eixos globals en la direcció del flux. Com es pot observar, la velocitat en la zona propera a la cara superior és molt propera a 10, en la zona posterior de l'edifici es poden observar velocitats negatives, degut a la separació de la capa límit.

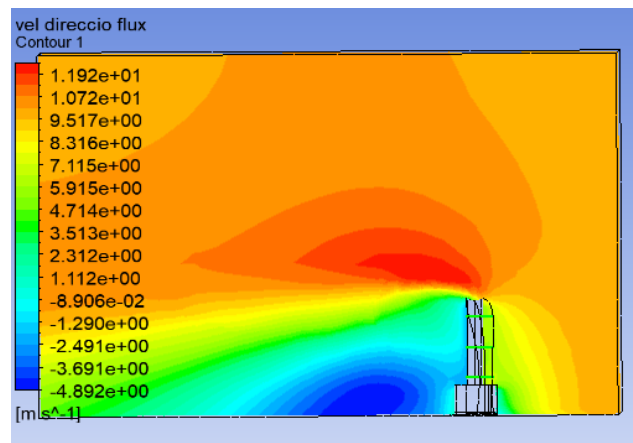


Figura 8.5.5.1.3: Countour de la velocitat en sentit del flux en pla simetria del volum de control

8.5.5.2 Pressions:

A la figura 8.5.5.2.1 es mostra, a l'esquerra, la pressió en la zona per on impacta el fluid, per tant hi ha les pressions màximes degudes al canvi de velocitat del fluid. Cal destacar que la zona de pressions elevades, com en el cas de 90° , és més gran que en el cas de 45° i en conseqüent del de 0° . Com ja s'ha comentat és lògic aquest resultat, si es té present que l'àrea d'impacte del fluid és més elevada. No obstant, a diferència del cas de 45° , la zona de pressions més elevades, representades pel color vermell, és més gran que en els altres casos. La pressió és molt elevada en dos regions relativament grans, representades pel color vermell i taronja fosc. Conseqüentment les zones laterals i la del darrere, la pressió relativa és negativa.

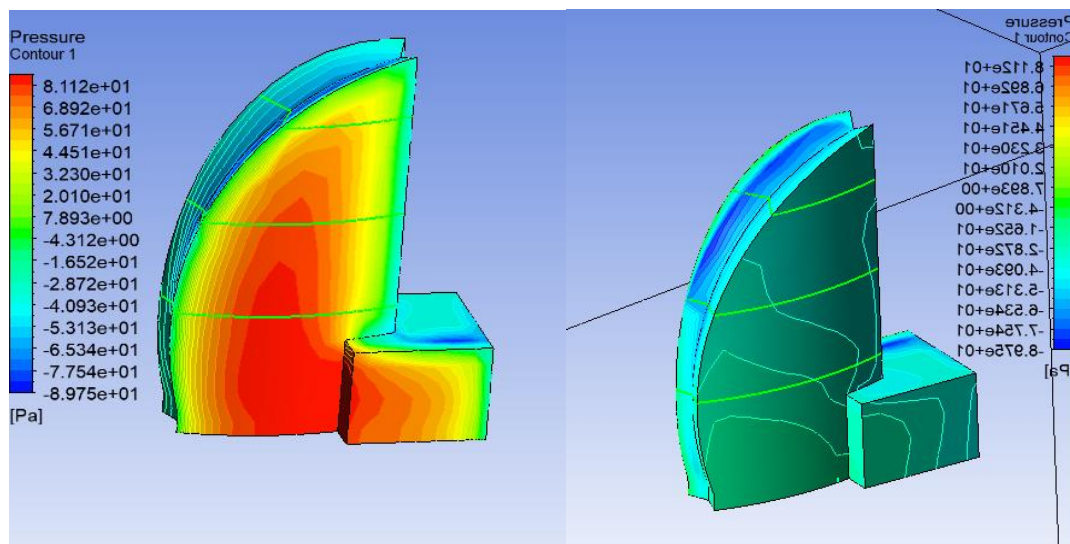


Figura 8.5.5.2.1: Distribució de pressions en la part del davant i del darrere de l'edifici.

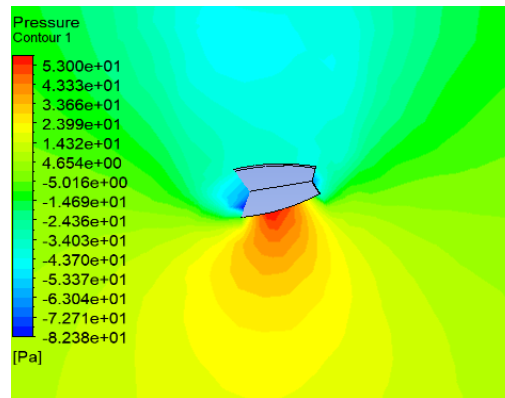


Figura 8.5.5.2.3: Distribució de pressions al pla a 66 metres

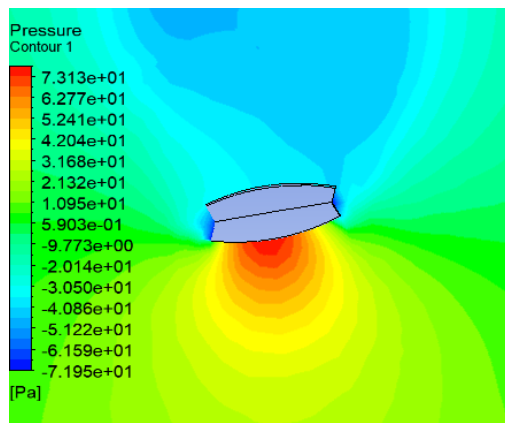


Figura 8.5.5.2.4: Distribució de pressions al pla a 46 metres

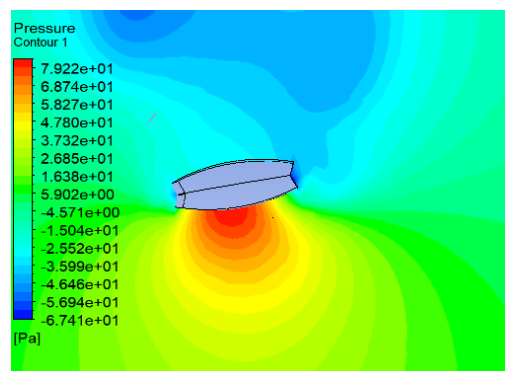


Figura 8.5.5.2.5: Distribució de pressions al pla a 26 metres

Amb l'observació del *contour* del pla a 66 metres es pot extreure que la zona on hi ha la sobrepressió, la pressió relativa arriba fins a 53 Pa, a més a més en casi tota aquesta regió, la pressió es troba per sobre dels 23,93 Pa.

Al pla a 46 metres es dóna una situació molt similar però amb uns valors diferents. En concret es pot observar com la pressió màxima és de 73,13 Pa, i amb la majoria d'aquesta zona per sobre de 31,68 Pa.

Al pla de 26 metres es pot observar una pressió màxima de 79,22 Pa i l'interval en el que es troba la majoria de pressions es troba limitat inferiorment per 37,32 Pa.

8.6 Comparació i anàlisi dels resultats de les diferents simulacions

El valor més important en aquestes simulacions és el C_D , ja que com s'ha mencionat anteriorment, quantifica la resistència que oposa l'edifici enfront a un flux. En la taula 8.6.1 es mostren els valors de les diferents simulacions realitzades.

ORIENTACIÓ	C_D	ÀREA PROJECTADA (m ²)
0º	0,56	
45º	1,13	3226,32
90º	1,24	3503,32
OEST	0,72	786,54
SUD	1,36	3634,07

Taula 8.6.1: Valors del C_D i les àrees projectades segons l'orientació

Com que el que interessa és tenir un valor petit d'aquest coeficient, de les tres primeres simulacions realitzades es pot dir que 0º és la millor, seguida de 45º i la pitjor és 90º. Si ho comparem amb l'orientació actual, es pot observar com la de 0º millora la de l'oest, i les de 45 i 90º milloren la del sud.

Així doncs, en un primer moment es pot pensar d'orientar per exemple l'edifici de tal manera que el sud coincideixi amb l'orientació que s'ha anomenat com a 0º. L'oest per tant coincidiria amb l'orientació que s'ha anomenat com a 90º. D'aquesta manera els coeficients passen de 0,72 i 1,36 a 0,56 i 1,24.

No obstant, més que disminuir el valor del C_D en les dos direccions, el que interessa és disminuir el valor màxim d'aquest coeficient.

Com que l'estructura és simètrica, es podria fer coincidir l'orientació de 0º amb el Sud-Oest. D'aquesta manera tant el sud com l'oest passen a veure l'edifici com en el cas de 45º. Aconseguint que els C_D siguin 1,13 en els dos casos i per tant inferiors als 1,36 o 1,24 corresponents als dos casos anteriors. Amb aquesta nova orientació s'aconsegueix la millor combinació per a reduir l'impacte del vent en el cas més desfavorable.

No obstant, aquesta no és la única millora que s'aconsegueix al orientar d'aquesta manera l'edifici.

Si ens fixem les figures corresponents a les pressions en plans horitzontals en funció de l'altura, i l'anàlisi que s'ha realitzat d'aquests, es pot observar com en el cas de 45º les pressions són molt elevades en la part inferior de l'edifici, sent aquestes més grans que en els casos de 90º o la situació actual del sud, mentre que les pressions en les zones superiors de l'edifici passa tot el contrari. En altres paraules, les pressions es concentren a menys altura en l'orientació proposada. D'aquesta manera per a una mateixa força, el moment flector que rebrà la base serà inferior.

Una altra millora d'aquesta orientació ha estat l'augment del moment d'inèrcia respecte l'eix de gir de la base. Cal comentar que aquest resultat no és tan fiable ja que s'ha considerat una massa uniforme, tot i així s'ha considerat que l'aproximació podia ser

fiable. A continuació s'explica com s'ha procedit per a trobar els moments d'inèrcia en el cas de l'orientació actual i l'orientació proposada.

Primer de tot s'ha buscat en quina direcció es troba la força total en el pla horitzontal, ja que la vertical no actua en el moment que rep la base. Per tant s'ha programat el setup dels casos 45° i sud, de manera que en els monitors points es mostrés els valors de força en els eixos x i z. Com ja s'ha comentat al llarg de la memòria, aquests eixos són iguals per al sòlid en totes les simulacions ja que l'únic que es modifica és l'orientació del volum de control. Per tant calculant la tangent a partir dels dos valors de la força en cada simulació, s'obté un angle. I amb aquest angle es pot representar l'eix neutre de la base.

ORIENTACIÓ	F _x (N)	F _z (N)	F _{TOT} (N)	ANGLE (°)
45°	70482	227130	237814	17,24
SUD	22487	302670	303504	4,25

Taula 8.6.2: Forces projectades, força total i angle d'aplicació de la força

Un cop trobat aquests valors, es passa a representar-los al model que s'ha creat amb solidworks. Així doncs s'ha creat un sistema de coordenades amb l'eix neutre i el perpendicular a aquest per a que el propi solidworks pogués fer els càlculs de moment d'inèrcia. Per a calcular aquests valors es necessita la massa. No obstant, com només es vol estudiar la relació de les inèrcies entre els casos i la massa és uniforme, es pot afegir qualsevol valor.

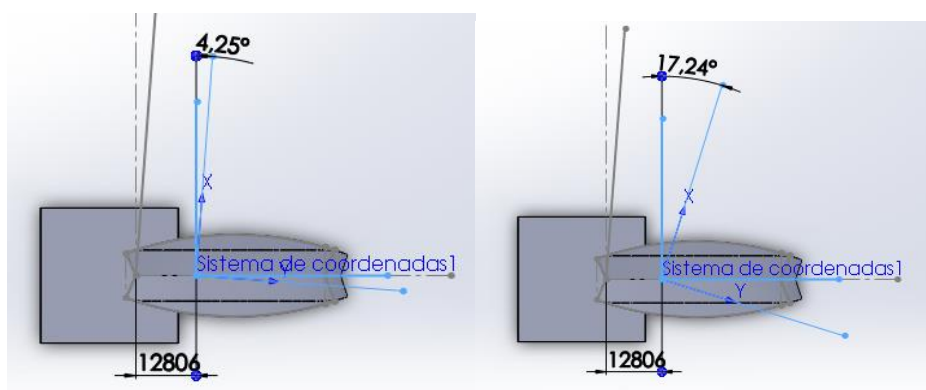


Figura 8.6.1: Representació de la direcció d'aplicació de la força resultant en les orientacions Sud i 45°.

A la figura 8.6.1 es pot observar els eixos de coordenades creats. Un cop realitzat aquest pas, es procedeix a calcular amb el solidworks les inèrcies en els eixos Y. Obtenint uns valors de 7513226 en l'orientació actual i 7881217 amb la proposta de millora.

$$\%augment = (7881217 - 7513226) / 7513226 * 100 = 4,89\%.$$

9. Impacte mediambiental

Pel que fa el impacte mediambiental, només s'ha de tenir en compte l'electricitat utilitzada per l'ordinador que es necessita per a realitzar les diferents simulacions, per tant l'impacte és mínim.

Les simulacions permeten realitzar menys experiments, ja que directament alguns casos es descarten quan no s'obtenen els valors desitjats. No obstant en aquest tipus d'estudi sempre és fa una validació final amb un experiment.

Així doncs, aquest estudi s'hauria de complementar amb una fase que requereix la creació de un model de l'edifici i per tant es necessiten diversos materials. Juntament amb l'electricitat que s'utilitza per a fer funcionar la maquinària amb la que es podrà realitzar l'experiment.

En altres paraules, si aquest estudi es realitzés en la seva totalitat, l'impacte ambiental seria superior.

10. Pressupost

El pressupost que es mostra a continuació només té en compte les hores dedicades i els recursos utilitzats fins al moment. No es té en compte la mà d'obra per la fabricació del model ni els recursos utilitzats en aquest. Els preus per hora utilitzats corresponen a un preu aproximat d'un estudiant en pràctiques. Així doncs s'ha agafat 10 €/hora. També s'ha considerat la proporció de les llicències que s'haurien de pagar. Es a dir, tenint en compte que les llicències són anuals i aquest projecte s'ha realitzat al llarg de cinc mesos, només s'ha agafat la part proporcional a l'anual.

	Quantitat	Preus per unitat (€/u)	Cost total
Hores dedicades	300	10	3000
Llicència Ansys Workbench	1	2709	2709
Llicència Solidworks	1	15162,5	15162,5
Consum Elèctric	300	0,1	30
Accés a Internet (mesos)	5	19	95
Total			20991,5 €

11. Conclusions

Després de realitzar l'estudi de l'impacte del vent en l'hotel W, s'ha arribat a un seguit de conclusions que s'exposen en aquest apartat.

En primer lloc s'ha aconseguit dissenyar un bon model de l'estructura de l'hotel amb l'ajuda del programari Solidworks. Facilitant la feina gràcies al fet de que és un programa treballat durant el grau. A més gràcies a les simplificacions fetes, s'ha pogut generar un model molt més senzill però molt semblant al que és té a la realitat.

Seguidament també s'ha pogut fer un anàlisi de les condicions de contorn en les que es troba l'edifici. Trobant així les direccions recurrents del vent i la velocitats màximes que es donen.

A més a més s'ha repassat la teoria de mecànica de fluids, que ha estat important per a entendre com actua el fluid i en consegüent quina informació s'havia de introduir al programari per a realitzar simulacions coherents i el més fidel possible a la realitat.

Així doncs, s'ha vist la importància de les diverses dades i valors introduïts al programari Ansys Workbench, tals com:

- Les mides del volum de control i quines zones d'aquest havien de ser més grans.
- La importància del mallat, la mida dels elements, la qualitat d'aquests i sobretot les zones més conflictives que requereixen més precisió
- Les condicions de contorn per a definir com interactua el fluid amb l'estructura
- Les condicions de la simulació per a que la solució convergeixi.

També s'ha aconseguit extreure els valors d'interès en l'apartat Results mitjançant les diverses eines de les que disposa el programa.

Un cop estudiat tots els casos s'ha pogut fer una comparativa per a poder realitzar una proposta de millora. Per tant s'ha trobat una orientació de l'edifici tal que s'ha millorat en diversos aspectes. Per una banda s'ha millorat el C_D del cas més desfavorable, i per altra banda s'ha millorat en aspectes més secundaris com la distribució de pressions i el moment d'inèrcia respecte l'eix neutre.

En consegüent s'ha pogut comprovar la importància que té l'estudi aerodinàmic i sobretot en casos com el d'estudi, en els que l'estructura és molt alta i el vent ocasiona un moment molt elevat. En el cas d'aquest TFG amb un simple canvi d'orientació s'ha arribat a millorar fins a tres aspectes que afecten directament als esforços que ha de suportar la base.

Per a poder validar aquest estudi, com a qualsevol altre, seria molt recomanable fer un experiment amb un túnel de vent. Si amb aquest experiment es trobés uns valors similars es podria concloure que l'estudi realitzat fa una bona aproximació.

No obstant és un tema difícil d'abordar ja que normalment els arquitectes creen un disseny del que volen i la feina dels enginyers radica en fer-ho possible. En el cas de l'hotel W, l'orientació forma una part molt important del tema estètic i per tant per molt que amb aquest treball s'hagi argumentat que es podria millorar l'aspecte aerodinàmic, segurament a l'arquitecte no li hagués interessat.

Tot i així, la comunicació entre arquitectes i enginyers, com s'ha pogut veure en aquest TFG, pot obrir la possibilitat a crear estructures més resistents als diferents esforços i en conseqüent es pot reduir costos en material o crear estructures més grans.

Bibliografia

- [1] <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/hotel-vela-barcelona-hotel-w-barcelona/>
- [2] Frank M. White. Mecànica de Fluidos. 6a edició. Pàg 148.
<https://es.scribd.com/document/366502192/Mecanica-de-Fluidos-6%C2%AA-Ed-Frank-M-White>
- [3] Frank M. White. Mecànica de Fluidos. 6a edició. Pàg 151.
<https://es.scribd.com/document/366502192/Mecanica-de-Fluidos-6%C2%AA-Ed-Frank-M-White>
- [4] FRANCESC XAVIER ESCALER PUIGORIOL, Apunts de Dinàmica Computacional de Fluids.
- [5] MARTINEZ, FERNANDA. Criterios base del diseño estructural en arquitectura.
https://es.slideshare.net/cfernanda_martinez/criterios-base-de-diseo-estructural-en-arquitectura
- [6] Codigo Técnico de la Edificación
<https://www.codigotecnico.org/>
- [7] Clima de Barcelona, Meteoblue.
https://www.meteoblue.com/es/tiempo/pronostico/modelclimate/barcelona_espa%C3%B1a_3128760
- [8] Google earth, ubicació hotel W.
<https://www.google.es/maps/place/W+Barcelona/@41.368437,2.1895986,155m/data=!3m1!1e3!4m7!3m6!1s0x12a4a3b185625025:0x59e80c780f7e2f0b!5m1!1s2018-09-03!8m2!3d41.368437!4d2.1901534>
- [9] Training by CFD Support.
<https://www.cfdsupport.com/OpenFOAM-Training-by-CFD-Support/node280.html>
- [10] Introduction to ANSYS CFD: Boundary Conditions, Release 14.5. ANSYS Inc.
- [11] Introduction to ANSYS CFD: Lecture 10 Turbulence, Release 14.5. ANSYS Inc.
- [12] JAVIERA ALEJANDRA MASCARÓ CUMSILLE, visualizador y evaluador de mallas geométricas mixtas 3d.
http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-mascaro_jc/pdfAmont/cf-mascaro_jc.pdf
- [13] Relación de aspect ratio en el método de los elementos finitos, Iberisa
http://www.iberisa.com/soporte/femap/aspect_ratio.htm
- [14] Properties of air. Native Dynamics company
<https://neutrium.net/properties/properties-of-air/>